

Masterarbeit
Maschinenbau/Mechatronik

Bewertung der Verwendbarkeit von Strahlungskarten für den Einsatz in der Regelung eines Parabolrinnensystems

von
TIM SCHLICHTING
Matr.-Nr.: 2269376

in Zusammenarbeit mit
DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT



Erstprüfer	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schramm
Zweitprüfer	Dr.-Ing. Tobias Bruckmann
Betreuer	Bijan Nouri Kareem Noureldin

9. April 2018

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit verwendet Strahlungskarten, um die Regelung eines Parabolrinnenkraftwerks zu optimieren. Diese beschreiben die orts aufgelöste direkte Strahlung, die auf die Umgebung eines Parabolrinnenkraftwerks wirkt. Um die Strahlungskarten im Zusammenhang mit der Regelung verwenden zu können, werden im Hauptteil dieser Arbeit Verfahren zur Klassifizierung der Strahlungskarten entwickelt, untersucht und bewertet. Die eingeführten Klassen beschreiben sowohl die räumliche als auch die zeitliche Variabilität der direkten Strahlung, die von vorübergehenden Wolkenzügen ausgelöst wird.

Das Ziel der Arbeit wird letztlich über eine Optimierung der Regelung basierend auf den eingeführten Klassen erreicht. Dafür werden die Auswirkungen der Klassen auf das Parabolrinnensystem unter Verwendung der Simulationsumgebung Virtual Solar Field untersucht. So können die auftretenden Probleme, innerhalb der verschiedenen Klassen, bei kommerziellen Parabolrinnenkraftwerken erkannt und entsprechende Lösungsansätze abgeleitet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse führen schließlich zu klassenspezifischen Regelungsstrategien, die in der Lage sind, das Kraftwerk während der vorherrschenden Wetterbedingungen zu stabilisieren.

Die optimierte Regelungsstrategie wird anhand von 30 Versuchstagen ausgewertet. Abschließend wird die Verwendbarkeit von Strahlungskarten in einem Parabolrinnensystem durch einen Vergleich der optimierten Regelung und der Ausgangsregelung bewertet.

Abstract

The present work deals with the usability of irradiance maps to support the control of a parabolic trough system. Irradiance maps describe the spatially-resolved Direct Normal Irradiance across the power plant. To utilize the information provided by the irradiance maps, classification methods are developed, investigated and evaluated. The created classes describe the spatial and temporal variability of Direct Normal Irradiance which are triggered by transient clouds.

The purpose of this work is to optimize the control by the information provided by the irradiance maps. Therefore, the impact of the transient clouds represented by the created classes needs to be investigated by using the simulation environment Virtual Solar Field. Thereby occurring problems in each class can be spotted and solution approaches derived. The gained knowledge leads to class specific control approaches, which are capable of stabilizing the solar power plant during transient cloud conditions.

During the entire optimization process, irradiance maps that represent 30 test days are investigated. Finally, the usability of irradiance maps in context with the control of a parabolic trough system is evaluated by comparing the results of the optimized Control to the initial control.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit sowie während meines gesamten Studiums unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. Schramm sowie Dr. Bruckmann, die mir diese Abschlussarbeit durch ihre Begutachtung ermöglicht haben. Das weiß ich sehr zu schätzen.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Betreuern Bijan Nouri und Kareem Nourel-din, ohne die diese Arbeit nicht hätte entstehen können. Mein Dank gilt vor allem ihrer Informationsbereitschaft und ihren interessanten Beiträgen in Bezug auf Parabolrinnenkraftwerke.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Kommilitonen Artur Hottman, Christoph Musch, Lennart Höveler und Mike Sanders bedanken. Denn ohne die zahlreichen lustigen Debatten während des Studiums wäre die Zeit nur halb so schön gewesen.

Doch der größte Dank gebührt meiner Freundin Maresa Wagner, die mir immer zur Seite steht. Ohne sie wäre diese Arbeit sowie der Auslandsaufenthalt nicht möglich gewesen.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Heike und Markus Schlichting sowie bei meiner Schwester Hanna Schlichting bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Erklärung

Ich versichere an Eides statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die ich wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe, mich auch keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe. Die Arbeit hat in dieser oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Duisburg, 9. April 2018

Name

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xiii
-----------------------	------

Tabellenverzeichnis	xv
---------------------	----

I. Einleitung	1
----------------------	----------

1. Kontext	3
-------------------	----------

1.1. Motivation	4
1.2. Parabolrinnenkraftwerke: Stand der Technik	5
1.3. Strahlungskarten	10

2. Simulation & Regelung	13
-------------------------------------	-----------

2.1. Simulationsmodell	13
2.1.1. Modellentwurf	14
2.1.2. Modellanwendung	20
2.2. Regelung eines Parabolrinnensystems am Beispiel von VSF	21
2.2.1. Formulierung des Regelungsziels	21
2.2.2. Beschreibung der Reglerelemente	22
2.2.3. Herausforderungen der Regelung	26

II. Hauptteil	31
----------------------	-----------

3. Klassifizierung von Strahlungskarten	33
--	-----------

3.1. Entwicklung von Verfahren zur Beschreibung der Variabilität	34
3.1.1. Zeitliche Variabilität	34
3.1.2. Räumliche Variabilität	37
3.2. Vergleich der Klassifizierungsverfahren	43
3.3. Verwendete Klassen der Klassifizierungsverfahren	45

4. Optimierung der Regelung eines Parabolrinnenkraftwerks	47
4.1. Untersuchung des Systemverhaltens	47
4.2. Adaptiver Pumpregler	51
4.3. Entwurf klassenspezifischer Regelungsstrategien	52
4.4. Bewertung der entworfenen Regler	66
 III.Schluss	 73
5. Zusammenfassung	75
6. Ausblick	77
A. Anhang	79
Literaturverzeichnis	93

Abbildungsverzeichnis

1.1. Andasol-3 Parabolrinnenkraftwerk in Granada	6
1.2. Aufbau eines Parabolrinnenkraftwerks	7
1.3. Sankey-Diagramm: Verluste eines Parabolrinnenkraftwerks	8
1.4. Nowcasting-System: Voxel-Modell	11
1.5. Beispiel einer Strahlungskarte	12
1.6. Validierung der Strahlungskarten	12
2.1. Satellitenaufnahme von Andasol-3/Nachbildung Andasol-3	18
2.2. Validierungsergebnisse VSF	19
2.3. Verwendung der Strahlungskarte in VSF	20
2.4. Blockschaltbild der Druckregelung des Solarfelds	23
2.5. Vergleich: konstante/adaptive Pumpregler-Parameter	23
2.6. Blockschaltbild der Fokussierungsregelung	26
2.7. Kollektor-Führungsgrößen innerhalb eines Loops	26
2.8. VSF-Simulation des 9. September 2015 mittels der Referenzregelung .	29
3.1. Klassifizierung der zeitlichen Variabilität anhand des 9. September 2015	36
3.2. Prozessschritte der Schattenkarten-Erzeugung	38
3.3. Klassifizierung der räumlichen Variabilität anhand des 9. September 2015	41
3.4. Darstellung der fünf Klassen, die die räumliche Variabilität des DNI beschreiben	42
3.5. Vergleich der Klassenhäufigkeit	43
3.6. Häufigkeit einer Koinzidenz der Klassen	44
4.1. Instabilität der Regelstrecke	49
4.2. Totzeit der Regelstrecke	49
4.3. Notwendiger DNI für eine Sollwertfolge	51
4.4. VSF-Simulationsergebnisse Clearsky 9. September 2015	55
4.5. VSF-Simulationsergebnisse Helle Schatten 9. September 2015	57

4.6. VSF-Simulationsergebnisse Kleine Schatten 9. September 2015	59
4.7. VSF-Simulationsergebnisse Große Schatten 9. September 2015	61
4.8. VSF-Simulationsergebnisse Starker Overcast 09.09.2015	63
4.9. Vergleich: Referenzregler und klassenspezifischer Regler Ziel Regelgüte	64
4.10. Vergleich: Referenzregler und klassenspezifischer Regler Ziel Fokus- sierung	65
4.11. Veränderung des Powerblock-Wirkungsgrads	69
4.12. Vergleich der Reglerverhalten (Netzdiagramm)	70
4.13. Erträge an allen 30 Versuchstagen	72

Tabellenverzeichnis

2.1. Regelparameter der Referenzregelung	27
3.1. Grenzwerte des zeitlichen Klassifizierungsverfahrens	36
3.2. Grenzwerte des räumlichen Klassifizierungsverfahrens	39
3.3. Verwendete Klassen der Klassifizierungsverfahren	46
4.1. Regelparameter der Fokussierungsregelung	53
4.2. Schwingungen der Austrittstemperatur	67

Abkürzungsverzeichnis

ASI All Sky Imagers.

CSL Clear Sky Library.

CSP Concentrated solar power dt. konzentrierende Solarthermie.

DHI Diffuse Horizontal Irradiance dt. Diffusstrahlung.

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

DNI Direct Normal Irradiance dt. direkte normale Bestrahlung.

GHI Global Horizontal Irradiance dt. Globalstrahlung.

MQF Mittlerer quadratischer Fehler.

VSF Virtual Solar Field.

Nomenklatur

Griechische Formelzeichen

α_f	Wärmeübertragungskoeffizient	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
$\Delta\Phi_d$	Winkelkorrektur des Kollektors	$[\circ]$
Δp	Druckverlust innerhalb eines Rohrs	$[Pa]$
ΔT_{WT}	Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Prozessdampf	$[^\circ C]$
$\eta_{endloss}$	Endverluste am Kollektor	
η_{field}	gesamter Wirkungsgrad des Solarfelds	
η_{opt}	optischer Wirkungsgrad	
$\eta_{PB,J}$	Jahresmittel des Powerblockwirkungsgrads	
η_{PB}	Wirkungsgrad des Powerblocks	
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad	
λ	Rohrreibungszahl	
ϕ	Höhenwinkel der Sonne	$[\circ]$
ρ_f	Dichte der Wärmeträgerflüssigkeit	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
ρ_w	Dichte des Absorbermaterials	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
θ_p	Totzeit des Systems	

Lateinische Formelzeichen

\dot{m}	Massenstrom der Wärmeträgerflüssigkeit	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
\dot{m}_{req}	theoretisch benötigter Massenstrom	$\left[\frac{kg}{s}\right]$
\dot{q}_{conv}	konvektiver spezifischer Wärmestrom auf das Fluid	$\left[\frac{W}{kg}\right]$
\dot{Q}_{loss}	thermische Verluste am Absorberrohr	$[W]$
\dot{q}_{loss}	spezifischer Wärmestrom der thermischen Verluste	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
\dot{Q}_{sol}	strahlungsabhängiger Wärmestrom auf das Fluid	$[W]$
\dot{q}_{sol}	spezifischer Wärmestrom auf das Absorberrohr	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
$\dot{Q}_{tauscher}$	Wärmestrom zwischen Fluid und Prozessdampf	$[W]$
\dot{V}	Volumenstrom der Wärmeträgerflüssigkeit	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$

\bar{c}_p	mittlere spezifische Wärmekapazität	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
A	Querschnittsfläche des Rohrs	$[m^2]$
A_{BF}	beschattete Fläche	$[m^2]$
A_{conv}	konvektive Fläche	$[m^2]$
A_{CS}	Außenfläche des Absorberrohrs	$[m^2]$
A_{SF}	Fläche des Solarfelds	$[m^2]$
c_{pw}	spezifische Wärmekapazität des Absorberrohrs	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$
D_i	Rohrinnendurchmesser	$[m]$
DNI	direkte Strahlung	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
DNI_{BF}	direkte Strahlung auf beschattete Fläche	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
DNI_{Clear}	direkte Strahlung des klaren Himmels	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
e_F	Regelabweichung Fokussierungsrate im Solarfeld	$[^\circ]$
e_{TK}	Regelabweichung Fluidtemperatur am Kollektor	$[^\circ C]$
e_{TS}	Regelabweichung der Solarfeldaustrittstemperatur	$[^\circ C]$
E_T	Ertrag pro Tag	$[€]$
G_{eff}	effektive direkte Strahlung auf das Absorberrohr	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
IAM	Einfallswinkel-Modifikationsfaktor	
K_c	proportionaler Verstärkungsfaktor eines Reglers	
k_c	Clearsky-Index	
$K_{P,Krit}$	kritischer proportionaler Verstärkungsfaktor	
$K_{p,total}$	gesamte hydraulischen Verluste	
K_P	proportionaler Verstärkungsfaktor bei moderaten Verhalten	
L	Länge des Rohrs	$[m]$
$LCoE$	Stromgestehungskosten	$\left[\frac{ct}{kWh}\right]$
N	Anzahl an Messungen	
p_{PB}	Ertragsverluste am Powerblock	$[£]$
p_{PB}	Ertragsverluste am Wärmespeicher	$[£]$
P_{th}	theoretische Leistung	$[W]$
r	Fokussierungsrate	
S_A	Schattenanteil	$[\%]$
S_i	Schattenindex	
t	Zeit	$[s]$
T_1	Eintrittstemperatur	$[^\circ C]$
T_2	Austrittstemperatur	$[^\circ C]$
T_c	Aggressivitätsfaktor des Reglers	
T_f	Temperatur der Wärmeträgerflüssigkeit	$[^\circ C]$
T_{Krit}	Periodendauer der Dauerschwingung	$[s]$
$T_{loop,out}$	Austrittstemperatur des Fluids aus dem Loop	$[^\circ C]$
T_p	Nachstellzeit eines Reglers	$[s]$
T_{SCA}	zulässige Temperatur des Fluids am Kollektor	$[^\circ C]$
T_{SP}	Solltemperatur des Fluids in der Mitte des Kollektors	$[^\circ C]$
T_w	Temperatur des Absorberrohrs	$[^\circ C]$
V	Variabilitätsindex nach Coimbra	
v_f	Geschwindigkeit der Wärmeträgerflüssigkeit	$\left[\frac{m}{s}\right]$
w	Breite des Parabolrinnen-Spiegels	$[m]$

Teil I.

Einleitung

KAPITEL 1

Kontext

Umweltverschmutzung und globale Erwärmung sind einige der größten Herausforderungen unserer heutigen Gesellschaft. Dennoch ist der Großteil der verwendeten Energiequellen noch immer eine hohe Belastung für Mensch und Natur. Nur 19,3 % der weltweit generierten Energie besteht aus erneuerbaren Energien [1]. Der Wechsel von einer fossil und nuklear basierten Energieerzeugung zu einem Zeitalter der erneuerbaren Energien ist ein notwendiger Schritt, um von nachhaltigen, fossil unabhängigen Energiequellen zu leben und die Erde langfristig zu schützen.

Ein Kraftwerk, das eine unbegrenzte freie Energieressource verwendet, wäre eine wünschenswerte Art der Stromerzeugung. Vor allem, wenn die verwendeten technischen Prozesse einen geringen Einfluss auf die Umwelt haben. Diese Anforderungen können durch Solarkraftwerke erfüllt werden. Sonnenwärmekraftwerke mit CSP¹-Technologie, wie z. B. Parabolrinnensysteme, wandeln durch Fokussierung der Einstrahlung auf eine Wärmeträgerflüssigkeit Solarenergie in thermische Energie um. Die gespeicherte thermische Energie wird genutzt, um mittels eines Wärmetauschers Prozessdampf zu erzeugen, der letztlich die Turbine versorgt. Heutzutage liefern CSP-Kraftwerke insgesamt 4,8 GW an Leistung mit Hauptstandorten in Spanien und den USA [1]. Dennoch gibt es noch immer Optimierungsbedarf, um Prozesse und Komponenten zu verbessern.

Andasol in Granada, Spanien, ist eine Anlage, die aus den ersten drei Parabolrinnenkraftwerken Europas besteht. Jedes der drei Kraftwerke erreicht eine Peakleistung von 50 MW [2]. Eine Studie zur Bestimmung der Stromgestehungskosten ergab, dass die Kosten im Fall des Andasol-1 Kraftwerks 21,2 ct²/kWh betragen. Hingegen wurden für das moderne Parabolrinnenkraftwerk Noor in Marokko Kosten von nur 8,1 ct/kWh berechnet [3]. Für das geplante Bokpoort-Projekt in Südafrika wurden be-

¹Concentrated Solar Power, auch als konzentrierende Solarthermie bekannt.

²Die allgemeingültige Währung innerhalb dieser Arbeit ist der Euro.

reits Stromgestehungskosten in Höhe von 5,9 ct/kWh berechnet [4]. Der Unterschied in den Stromgestehungskosten der Kraftwerke resultiert zum einen durch die zunehmende Optimierung der Prozesse und Komponenten in den letzten Jahren, aber auch durch die Einstrahlungsintensität und die gegebenen Wetterbedingungen am jeweiligen Kraftwerksstandort. So kommt es, dass die Stromgestehungskosten von Parabolrinnenkraftwerken in einigen Regionen schon konkurrenzfähig, in anderen jedoch noch weitere Optimierungen erforderlich sind. Ein geringer Beitrag zur Verbesserung des Betriebs eines Parabolrinnensystems während vorübergehender Wolkenzüge wird im Rahmen dieser Masterarbeit geleistet. Dazu wird geprüft, inwiefern ein Regler unter Verwendung von zeitlich und räumlich aufgelösten Strahlungskarten den Betrieb eines Parabolrinnenkraftwerks während vermehrter Wolkenbildung verbessert.

Im weiteren Verlauf des Kapitels wird die Motivation der Arbeit formuliert und in den Kontext eingeordnet, der Aufbau und der Betrieb eines Parabolrinnensystems erläutert sowie die grundlegende Regelung dargestellt. Zum Ende des Kapitels wird das Konzept der Strahlungskarten erklärt. Die Einleitung endet mit Kapitel 2, in dem sowohl das Simulationsmodell als auch die Regelungsstrategie eines kommerziellen Parabolrinnenkraftwerks detailliert vorgestellt wird. Um die enthaltenen Informationen einer Strahlungskarte für die Regelung nutzen zu können, müssen in Kapitel 3 verschiedene Klassifikationsverfahren entwickelt und auf ihre Verwendbarkeit untersucht werden. Zudem behandelt der Hauptteil mit Kapitel 4 die Optimierung der Regelungsstrategie eines Parabolrinnensystems basierend auf den Informationen der Strahlungskarte. Den Schluss der Arbeit bildet die Zusammenfassung, in der letztlich ein Fazit über die Verwendbarkeit der Strahlungskarten gezogen wird sowie ein Ausblick, in dem verbleibende Probleme und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

1.1. Motivation

Die Effektivität eines Parabolrinnenkraftwerks weist eine wesentliche Abhängigkeit vom Betriebsstandort auf. Der zu Beginn dieses Kapitels gezogene Vergleich zwischen den Andasol-Kraftwerken und dem in Marokko errichteten Noor-Kraftwerk veranschaulicht diese These. Der Unterschied in den Stromgestehungskosten von 13,1 ct/kWh ist eine erhebliche Differenz. Dies lässt sich, wie oben beschrieben, u. a. auf die standortspezifischen Wetterbedingungen zurückführen, die zugleich mit einem unterschiedlichen Aufkommen von Wolken einhergehen. Ein Vergleich der direkten Strahlung zeigt, dass am Standort der Andasol-Kraftwerke eine jährliche direkte Strahlung von $2020 \frac{kWh}{m^2}$ herrscht, während es in der Region des Noor-Kraftwerks zu einer direkten Strahlung von $2500 \frac{kWh}{m^2}$ pro Jahr kommt [5]. Wolkenzüge verringern die Menge an direkter Strahlung, sodass eine ortsaufgelöste Strahlung entsteht, die den Ertrag, aber auch die Regelgüte³ der Regelung eines Parabolrinnenkraftwerks beeinflusst. Letzteres resultiert aufgrund eines Überhitzen der Wärmeträgerflüssigkeit in denen Bereichen des Solarfelds, in denen die direkte Strahlung hoch ist,

³Beschreibt die Qualität der Regelung in Bezug auf die Sollwertfolge.

während das Fluid zeitgleich in von Wolken beschatteten Bereichen unterkühlt. Die Folge ist ein Differieren der Temperatur der Wärmeträgerflüssigkeit über das gesamte Solarfeld, sodass die Regelabweichung zu den Zeiten zu denen die Wolken vorüberziehen, hoch ist. Durch die Entwicklung der Strahlungskarten können Informationen über die aktuelle zeitlich und räumlich aufgelöste Strahlung abgeleitet werden. Es gilt nun, die auftretenden Effekte der entstehenden zeitlichen und räumlichen Variabilität des DNI zu untersuchen.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat mit dem Virtual Solar Field eine Simulationsumgebung entwickelt, die in der Lage ist, das gesamte Verhalten eines Parabolrinnenkraftwerks zu beschreiben. Die Verfügbarkeit von Strahlungskarten und die entwickelte Simulationsumgebung des DLR ermöglichen eine ausgiebige Untersuchung der von Wolken hervorgerufenen Störungen. Die erlangten Erkenntnisse können zu neuen Regelungsstrategien führen, die den Einfluss von Wolken geringer halten. Ein stabileres System während zeitlicher und räumlicher Variabilität des DNI sowie eine Steigerung der Effizienz eines Parabolrinnenkraftwerks würde zugleich eine positive Bewertung von Strahlungskarten bedeuten.

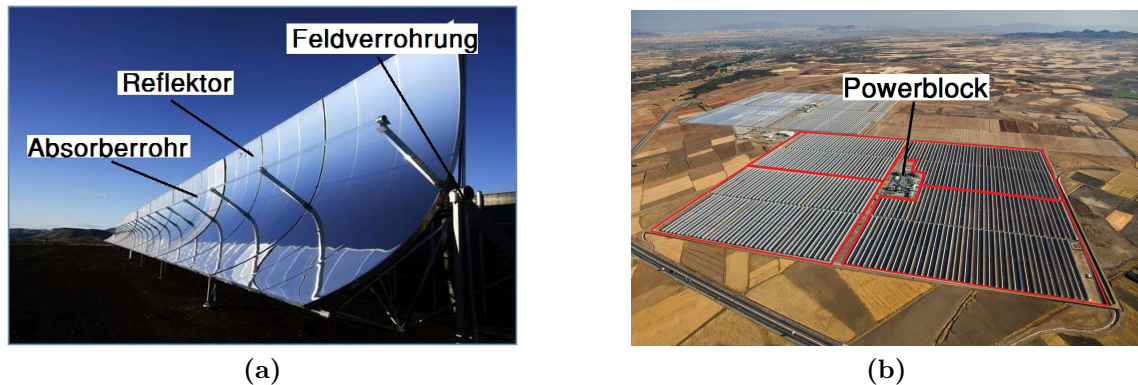
1.2. Parabolrinnenkraftwerke: Stand der Technik

Der erste Parabolrinnen-Kollektor wurde im Jahre 1880 von Jon Ericsson zum Antrieb eines Heißluftmotors entworfen. 1913 errichteten F. Shuman und C.V. Boys ein Parabolrinnenkraftwerk zur Versorgung eines Bewässerungssystems in Meadi, Ägypten. Das 45 kW-Kraftwerk konnte trotz seines Erfolges nicht mit den niedrigen Brennstoffpreisen der ausgereiften Verbrennungstechnologien konkurrieren, sodass es während des ersten Weltkriegs abgeschaltet wurde. Durch die steigenden Preise von fossilen Brennstoffen im Jahre 1983 wurden die ersten beiden kommerziellen Parabolrinnenkraftwerke in der Mojave-Wüste, Kalifornien, gebaut. Seit die Solarkraftwerke ihren Betrieb im Jahre 1985 und 1986 starteten, wurden insgesamt neun Sonnenwärmekraftwerke in der Mojave-Wüste errichtet. Durch den erfolgreichen Betrieb der bis heute aktiven Kraftwerke stieg die Beachtung der konzentrierenden Solarthermie an. Heutzutage gibt es weltweit 121 CSP-Kraftwerke, wovon sich die meisten in Spanien und den USA befinden. Außerdem sind weitere Projekte in Teilen Asiens und Nordafrikas geplant [6, 7].

Die Funktionsweise eines Parabolrinnenkraftwerks beruht auf der Verwendung eines Parabolrinnen-Kollektors (Abbildung 1.1a). Dieser besteht aus einem Absorberrohr, dem Reflektor und der Feldverrohung. Direkte, normale Bestrahlung (DNI⁴) wird in der Brennnlinie des parabolisch geformten Kollektors auf das Absorberrohr fokussiert. Die konzentrierte Strahlung führt zur Erwärmung des Absorberrohrs und schließlich zur Wärmeübertragung an die Wärmeträgerflüssigkeit. Als Wärmeträgerflüssigkeit wird herkömmliches Thermoöl verwendet, jedoch untersuchen aktuelle Forschungsarbeiten alternative Wärmeträgerflüssigkeiten, wie z. B. flüssiges Salz in [8] oder auch Silikonöle. Der Nachteil des Thermoöls ist neben einer hohen Toxizität eine zulässige Maximaltemperatur von 400 °C, wodurch die mögliche Leistungsabgabe

⁴Direct Normal Irradiance

der Turbine begrenzt wird. Silikonöle, wie HELISOL[®]5, vertragen hingegen Temperaturen bis zu 450 °C, benötigen durch eine geringe Viskosität jedoch eine höhere Pumpleistung [9]. Flüssiges Salz ermöglicht eine Temperatur von bis zu 500 °C, sodass ein wesentlich höherer Wärmestrom an den Prozessdampf übertragen werden kann, was zugleich eine Ertragssteigerung bedeutet. Die Gefahr des flüssigen Salzes ist eine Gefriertemperatur von 150 °C, die eine Herausforderung bei dessen Anwendung darstellt [8].



Quelle: angelehnt an [10] [11]

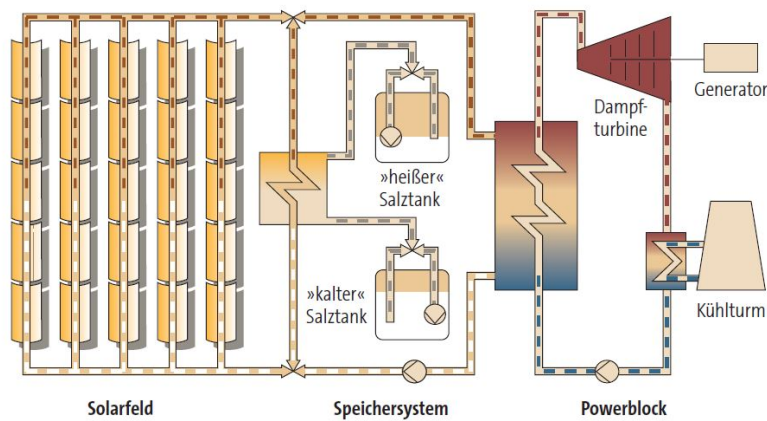
Abbildung 1.1.: a) Aufbau eines Parabolrinnen-Kollektors. b) Das Andasol-3 Parabolrinnenkraftwerk in Granada, Spanien.

Der Aufbau eines Parabolrinnenkraftwerks ist am Beispiel des Andasol-3 Kraftwerks in Granada, Spanien, dargestellt (Abbildung 1.1b). Andasol-3 ist in vier Kollektorfelder unterteilt. Die Kollektorfelder enthalten 156 parallel geschaltete Loops, die sich ungleichmäßig über die vier Kollektorfelder verteilen. In jedem Loop wiederum befinden sich vier in Reihe geschaltene Kollektoren, um die Wärmeträgerflüssigkeit mit einer Eintrittstemperatur von 290 °C sukzessive auf eine gewünschte Solltemperatur von 393 °C zu erhöhen. Die Anzahl an Loops sowie Kollektoren pro Loop sind abhängig von der Dimensionierung des jeweiligen Parabolrinnenkraftwerks [12].

Zur Sicherstellung einer stabilen Solltemperatur und Verhinderung von Überhitzung kann die Fokussierungsrate von jedem Kollektor innerhalb eines Loops individuell eingestellt und somit die übertragene Wärme auf das Fluid reduziert werden. Die Fokussierungsrate wirkt direkt auf das System und beeinflusst die Temperatur innerhalb des Loops. Daher repräsentiert jeder Loop des Kraftwerks einen geschlossenen Regelkreis, wobei die Solltemperatur die Führungsgröße darstellt, die Looptemperatur die Regelgröße und die Fokussierungsrate die Stellgröße. Wenn die Regelung versagt und in der Folge die Looptemperatur über 398 °C steigt, wird ein Notfallprozess eingeleitet, der alle Kollektoren innerhalb des Loops zur Defokussierung zwingt. Sollte die Wärmeträgerflüssigkeit über 400 °C steigen, kann dies sowohl das Thermoöl als auch die Kraftwerkskomponenten dauerhaft schädigen und zu einer Beschleunigung der Degradierungsprozesse führen.

Um die vom Fluid zurückzulegende Strecke möglichst gering zu halten und somit sowohl thermische als auch hydraulische Verluste zu reduzieren, befindet sich die Turbine in der Mitte des Parabolrinnenkraftwerks im sogenannte Powerblock (Ab-

bildung 1.1b und 1.2). Aus diesem strömt das Fluid, das durch eine Pumpe am Hauptrohr angetrieben wird, in die vier Kollektorfelder. Hier verteilt sich das Fluid zwischen allen Loops, wird durch die Kollektoren erhitzt und strömt wieder aus den Loops heraus. Anschließend mischen sich die erwärmten Wärmeträgerflüssigkeitsströme und fließen zurück zum Hauptrohr. Dort mischen sich die Fluidströme aus jedem Kollektorfeld erneut und es resultiert eine Feldaustrittstemperatur. Zuletzt strömt das Fluid zurück in den Powerblock, um mittels der gespeicherten Wärme über den Wärmetauscher Prozessdampf zu erzeugen, der die Turbine antreibt. Dadurch wird die Wärmeträgerflüssigkeit abgekühlt und der Prozess wiederholt sich. Wenn das Parabolrinnenkraftwerk die erzeugte elektrische Energie nicht in das Stromnetz einspeisen kann, wird die thermische Energie der Wärmeträgerflüssigkeit in einem Flüssigsalztank-System zwischengespeichert und kann während vorübergehender Wolkenzüge verwendet werden, um einen konstanten Betrieb des Kraftwerks zu gewährleisten. Die Verfügbarkeit eines kostengünstigen und zugleich großen thermischen Energiespeichers ist einer der Vorteile gegenüber den eigentlich günstigeren Photovoltaikanlagen und stellt die Daseinsberechtigung des Parabolrinnen-Kollektors dar. Die Austrittstemperatur des Solarfelds ist ein ent-



Quelle: [2]

Abbildung 1.2.: Aufbau eines Parabolrinnenkraftwerks.

scheidender Parameter für die Effizienz des Kraftwerks und wird, so wie die Loop-temperatur, bei 393 °C gehalten. Vorübergehende Wolken beeinflussen den auf die Kollektoren treffenden DNI, sodass die Looptemperaturen des Kraftwerks variieren. Es resultiert eine abweichende Austrittstemperatur des Kraftwerks. Schwankungen in der Feldaustrittstemperatur werden über den anliegenden Pumpdruck ausgeglichen. Die Abhängigkeit der Looptemperatur vom Pumpdruck ist durch eine vereinfachte Energiebilanz dargestellt.

$$T_2 = \frac{\dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{loss}}{\bar{c}_p \dot{m}_f} + T_1 \quad (1.1)$$

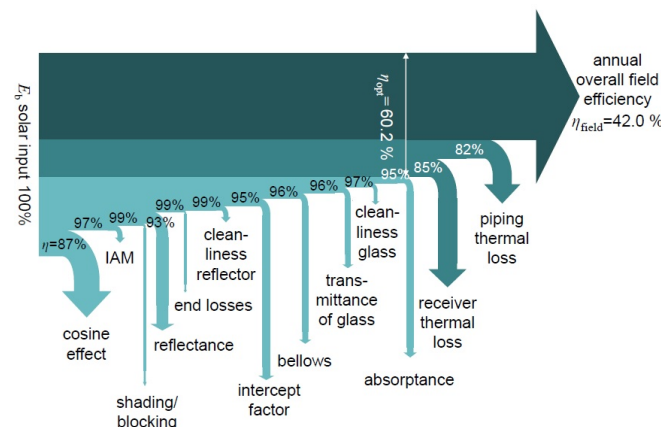
mit der Loopaustrittstemperatur T_2 , der Loopeintrittstemperatur T_1 , dem strahlungsabhängigen Wärmestrom auf das Fluid \dot{Q}_{sol} , den thermischen Verlusten \dot{Q}_{loss} , der mittleren spezifischen Wärmekapazität \bar{c}_p und dem Massenstrom \dot{m}_f , der durch

den Pumpdruck bestimmt wird. Unter der Annahme eines konstanten \dot{Q}_{sol} und \bar{c}_p steigt die Loopaustrittstemperatur bei einer Verringerung des Pumpdrucks bzw. bei einem sinkenden Massenstrom. Hingegen sinkt die Loopaustrittstemperatur, sobald der Pumpdruck ansteigt. Dies ermöglicht einen zusätzlichen geschlossenen Regelkreis, der eine direkte Regelung der Feldaustrittstemperatur zulässt. Hier bildet die Feldaustrittstemperatur die Regelgröße, die Solltemperatur von 393 °C bleibt die Führungsgröße und der anliegende Pumpdruck repräsentiert die Stellgröße.

Folglich wird das Parabolrinnenkraftwerk sowohl über den Pumpdruck als auch über die Fokussierungsrate geregelt. Hierbei beeinflusst der Pumpdruck die Feldaustrittstemperatur sowie jede Looptemperatur. Wohingegen die Fokussierungsrate eines einzelnen Kollektors einen signifikanten Einfluss auf die jeweilige Looptemperatur, aber nur einen geringen Einfluss auf die Austrittstemperatur des Solarfelds hat. Erst eine Defokussierung von mehreren Kollektoren macht sich in der Austrittstemperatur bemerkbar.

Für eine effiziente Energieumwandlung folgt der Kollektor während des Tags dem Sonnenverlauf. Dazu wird ein einachsiges Nachführsystem verwendet, welches die Bewegung der Sonne aus dem Norden in Richtung Süden verfolgt und somit eine ständige Fokussierung ermöglicht [7]. Durch die Verwendung eines einachsigen Nachführsystems können die Kollektoren jedoch nicht vollständig normal zur einfallenden Einstrahlung ausgerichtet werden, sodass kontinuierlich Verluste entstehen.

Der gesamte Prozess eines Parabolrinnenkraftwerks weist vom Kollektor bis zum Wärmetauscher sowohl optische als auch thermische Verluste auf, die im Sankey-Diagramm (Abbildung 1.3) dargestellt werden. Es entstehen zwei Wirkungsgrade: Der optische Wirkungsgrad η_{opt} und der thermische Wirkungsgrad η_{th} , die einen Gesamtwirkungsgrad $\eta_{opt} \cdot \eta_{th} = \eta_{field}$ bilden. Die thermischen Verluste beschränken sich neben den konvektiven Wärmeverlusten auf Strahlungswärmeverluste am Absorberrohr. Letztere bilden im Bereich der thermischen Verluste den größeren Anteil, da durch den Aufbau des Absorberrohrs die konvektiven Verluste sehr gering ausfallen.



Quelle: [13]

Abbildung 1.3.: Sankey-Diagramm zur Beschreibung der Energieumwandlung eines Parabolrinnenkraftwerks.

Hingegen bestehen die optischen Verluste gemäß [7] unter anderem aus:

- **Kosinus-Effekt:** Dadurch, dass der Kollektor zu keinem Zeitpunkt senkrecht zur direkten Strahlung ausgerichtet ist, entsteht ein Winkel, der die Rotation des Kollektors beschreibt, die notwendig ist, um den Kollektor normal zur einfallenden Strahlung auszurichten. Der Kosinus dieses Winkels bestimmt das Ausmaß der Verluste, die aufgrund ungenutzter Strahlung entstehen.
- **IAM:** Die Komponenten des Kollektors werfen in Abhängigkeit der Sonnenposition einen unterschiedlich großen Schatten auf den Reflektor, sodass auf die beschattete Fläche keine Strahlung trifft. Der IAM beschreibt dabei den Winkelkorrekturfaktor, der in Abhängigkeit der Sonnenposition einen Wert zwischen Null und Eins annehmen kann (Abbildung A.1 im Anhang). Die IAM-Verluste sind Null, wenn die Sonne am Zenit steht, da die Kollektoren zu diesem Zeitpunkt vollständig in den Himmel ausgerichtet sind.
- **Endverluste:** In Abhängigkeit der Sonnenposition trifft die direkte Strahlung seitlich auf den Reflektor, sodass dieser die Strahlen, die auf das Ende des Kollektors treffen, nicht mehr auf das Absorberrohr, sondern über dieses hinaus reflektiert.
- **Beschattung/Blocken:** In Abhängigkeit der Sonnenposition können Komponenten des Kollektors die reflektierte Strahlung blocken, sodass diese nicht auf das Absorberrohr trifft.
- **Sauberkeit:** Mit steigender Verschmutzung der Reflektoren sowie des Absorberrohrs wird der optische Wirkungsgrad zunehmend verringert. Aus diesem Grund werden die Reflektoren regelmäßig gereinigt, um so der Verschmutzung entgegenzuwirken.
- **Transmission:** Der Absorber nimmt in Abhängigkeit seines Materials nur einen Anteil der auftreffenden Strahlung auf.
- **Absorption:** In Abhängigkeit des Absorberrohrmaterials entstehen Absorptionsverluste, die den Anteil an aufgenommener Strahlung reduzieren.

DNI - Direct Normal Irradiance

Von der gesamten Strahlung, die die Erde erreicht, treffen im Durchschnitt nur insgesamt 52 % auf die Erdoberfläche [7]. Zusätzlich unterteilt sich die gesamte Strahlung, auch als Global Horizontal Irradiance (GHI) bekannt, in Direct Normal Irradiance (DNI) und Diffuse Horizontal Irradiance (DHI) [14]. Der Anteil des DHI repräsentiert die Strahlung, die durch Partikel in der Atmosphäre zerstreut wird und dadurch nicht auf direktem Weg auf die Erde trifft. Hingegen beschreibt der DNI $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ die Strahlung, die über einen direkten Pfad auf die Erdoberfläche trifft. CSP-Kraftwerke können nur den DNI fokussieren, da dieser aus einer eindeutigen Richtung das Kollektorfeld erreicht. Dementsprechend werden die Flächen der Kollektoren stetig mit der Sonne mitgeführt, um eine effiziente Energieumwandlung zu gewährleisten.

Vorübergehende Wolkenzüge verringern den DNI durch zusätzliche Zerstreuung der Strahlung und bewirken eine zeitliche und räumliche Änderung des DNI. Die zeitliche Änderung wird durch eine wechselhafte Beschattung der Kollektoren geprägt. Bei der Betrachtung eines einzelnen Kollektors, der eine zeitlich veränderte Beschattung innerhalb einer festgelegten Zeitspanne erfährt, verändert sich die Menge an auftreffender Strahlung signifikant und wiederholt. Dies äußert sich in einem sprunghaften Wärmestrom \dot{Q}_{sol} und führt zu starken Schwankungen der Looptemperatur. Die Intensität der zeitlichen Änderung bestimmt das Ausmaß dieses Effektes und wird im weiteren Verlauf als zeitliche Variabilität bezeichnet. Hingegen beschreibt die räumliche Änderung eine unterschiedliche Beschattung des gesamten Solarfelds zu einem festgelegten Zeitpunkt. Der Vergleich eines beschatteten und eines frei bestrahlten Kollektors zeigt einen erheblichen Unterschied im erzeugten Wärmestrom \dot{Q}_{sol} . Die Wolken zerstreuen und absorbieren die Strahlung, sodass nur ein Teil des DNI auf den schattierten Kollektor trifft. Zeitgleich trifft auf die ungeschatteten Kollektoren ein vergleichsweise hoher DNI. Es kommt zu ortsabhängigen Temperaturunterschieden des Fluids, die bei einer hohen räumlichen Änderung sogar zu einer Überhitzung oder Unterkühlung der Wärmeträgerflüssigkeit führen können. Die Intensität des örtlichen Unterschieds wird im weiteren Verlauf als räumliche Variabilität bezeichnet.

Beide Arten der Variabilität greifen als Störgröße in das Systemverhalten ein und beeinträchtigen die Regelgüte. Die Herausforderung der Regelung ist es, die Einflüsse von vorübergehenden Wolkenzügen auf das System auszuregulieren, indem es die Austrittstemperatur stabilisiert und die Looptemperaturen innerhalb der für das Fluid spezifischen Grenzwerte hält.

1.3. Strahlungskarten

Um den Betrieb eines Parabolrinnenkraftwerks unter Einflüssen von Wolken zu optimieren, wurde das Nowcasting-System in [15] entwickelt. Das Tool erzeugt Strahlungskarten mit unterschiedlichen Vorlaufzeiten, die den zeitlich und räumlich aufgelösten DNI auf einer begrenzten Fläche um das Kraftwerk herum approximieren. Dafür werden Bilder des Himmels mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Sekunden durch vier räumlich verteilte All Sky Imagers⁵ (ASI) aufgenommen. Das System ist in der Lage, aus den erzeugten Bildern Strahlungskarten in weniger als 30 Sekunden zu erzeugen und ist somit echtzeitfähig. Für die Erstellung der Strahlungskarten müssen insgesamt vier Prozessschritte durchlaufen werden [15].

Zuerst beginnt der Segmentierungsprozess. Das Ziel dieses Prozesses ist die Abgrenzung des klaren Himmels⁶ von Wolken. Hierzu verwendet das Tool eine vierdimensionale Clear Sky Library (CSL), die eine Sammlung von Clearsky-Pixeln zu unterschiedlichen Sonnenständen und Trübungsgraden der Atmosphäre enthält [16]. Aufgrund dieser Berücksichtigung weist jedes Pixel der CSL ein unterschiedliches Blau-zu-Rot-Verhältnis auf, das dieses als einen Clearsky-Pixel charakterisiert. Auf

⁵Kamera mit Fischaugenobjektiv zur Aufnahme eines weiten Bildausschnitts.

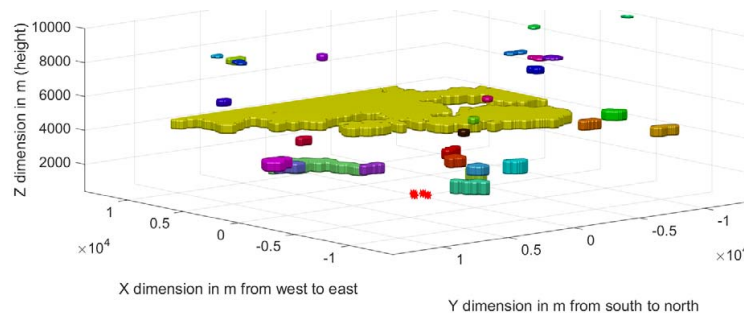
⁶Der klare Himmel wird im folgenden als Clearsky bezeichnet.

Basis des Blau-zu-Rot-Verhältnisses wird jedes Pixel der vier Bilder untersucht und unter Berücksichtigung vordefinierter Schwellwerte als Clearsky-Pixel oder Wolke eingestuft. Durch Verwendung der auf dem Solarfeld verteilten Pyrheliometerstationen⁷ lässt sich der auf die von einer Wolke beschattete Fläche wirkende DNI bestimmen. Zudem berechnet das Tool gemäß des in [17] beschriebenen Algorithmus den Clearsky-DNI für den aktuellen Zeitpunkt. Der Quotient aus beiden DNI-Werten ergibt letztlich den Transmissionsgrad der identifizierten Wolken [15].

Im nächsten Schritt ermittelt das Tool über einen photogrammetrischen Ansatz die Position, die Größe und die Höhe der Wolken und modelliert diese als Wolkenobjekte über die Methode des Voxel-Carving in einem 3D-Voxel-Raum (Abbildung 1.4) [15].

Durch Kreuzkorrelation kann aufgrund der Information der derzeitigen Wolkenposition sowie der Wolkenposition im vorherigen Modell die räumliche Verschiebung innerhalb der letzten 30 Sekunden bestimmt und der Richtungsvektor der Wolke berechnet werden. Anschließend lässt sich mittels des Richtungsvektors sowohl die Geschwindigkeit als auch die Position der Wolken über einen Zeitraum von bis zu 15 Minuten näherungsweise bestimmen [15].

Zuletzt wird die Position und Größe des von einer Wolke geworfenen Schattens ermittelt, da auf diese Fläche in Abhängigkeit des Transmissionsgrad ein bestimmter DNI wirkt. Hierzu werden die modellierten Wolkenobjekte im Voxel-Raum sowie die Position der Sonne genutzt, um die beschatteten Flächen zu bestimmen [15].



Quelle: [15]

Abbildung 1.4.: Darstellung der Wolken innerhalb des Voxel-Modells mit einer Größe von 20x20x10 km und einer Auflösung von 50 m.

Die in Abbildung 1.5 dargestellte Strahlungskarte repräsentiert den orts aufgelösten DNI für den untersuchten Bereich. Für jeden Pixel wird der zugehörige DNI-Wert in $\frac{W}{m^2}$ angegeben. Die räumliche Auflösung der dargestellten Karte beträgt 5 m in beide Dimensionen. Für jeden Zeitschritt werden insgesamt 16 Karten generiert. Dabei beschreibt die erste Karte den orts aufgelösten DNI für den derzeitigen Zeitpunkt ($t = 0$ min) und jede weitere Karte den Zustand für die jeweils nächste Minute.

In der durchgeführten Validierung in [18] vergleicht der Autor die Ergebnisse des Nowcasting-Systems mit Resultaten des ebenfalls vom DLR entwickelten Schattenkamera-Systems⁸. Da die auf dem Solarfeld befindlichen Pyrheliometerstationen nur punk-

⁷Das Pyrheliometer ist ein Strahlungsmessgerät und misst den DNI.

⁸Das Schattenkamera-System erkennt im Gegensatz zum Nowcasting-System nicht die Wolken, sondern die von den Wolken auf das Solarfeld geworfenen Schatten.

tuelle DNI-Messungen zulassen, ist der Vergleich mit dem Schattenkamera-System notwendig, um die Genauigkeit des orts aufgelösten DNI auf der gesamten untersuchten Fläche zu validieren. Der so ermittelte mittlere absolute Fehler weist sowohl eine starke Abhängigkeit von der Vorlaufzeit als auch von der Kantenlänge der untersuchten quadratischen Fläche auf (Abbildung 1.6). Die erzeugte Strahlungskarte für den derzeitigen Zustand ($t = 0$ min) führt bei einer kraftwerkstypischen Kantenlänge von 1800 m zu einem mittleren absoluten Fehler von circa 8 %. Bei einer Vorlaufzeit von 15 Minuten entsteht jedoch ein mittlerer absoluter Fehler von 14,8 % [15]. Insgesamt ermöglicht das entwickelte Nowcasting-System die Erzeugung einer orts aufgelösten Strahlungskarte und lässt dadurch eine Vorhersage über die zeitliche und räumliche Variabilität des DNI innerhalb der nächsten 15 Minuten zu. Dabei bietet das Tool eine ausreichende Genauigkeit für die Untersuchung von Solarfeldern mit einer für diese typischen Größe.

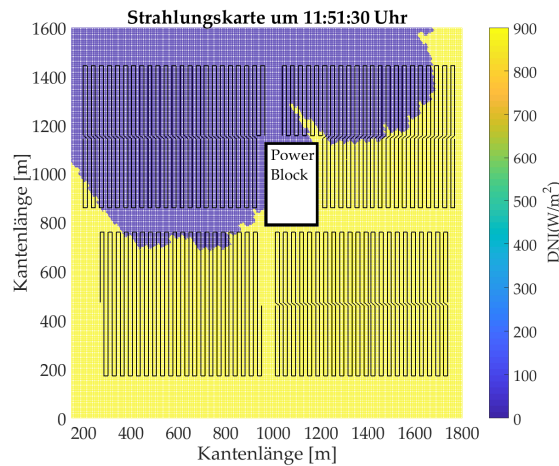
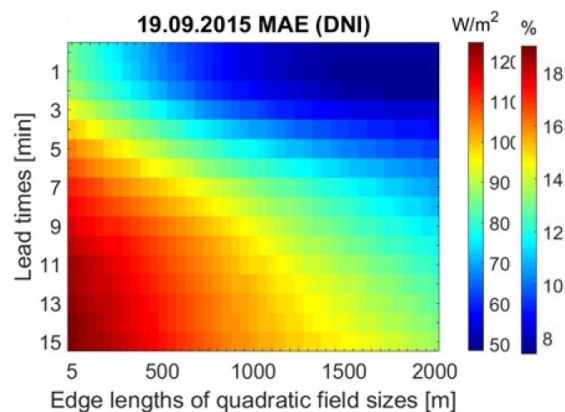


Abbildung 1.5.: Strahlungskarte zur Darstellung des orts aufgelösten DNI.



Quelle: [15]

Abbildung 1.6.: Mittlerer absoluter Fehler in Abhängigkeit der Vorlaufzeit und der Kantenlänge der untersuchten quadratischen Fläche.

Simulation & Regelung

Parabolrinnenkraftwerke haben in den letzten Jahren bedeutsame Fortschritte im Bereich der Betriebsoptimierung erfahren. Diese beruhen primär auf der Reduzierung von Verlusten, die durch Komponenten und Prozesse hervorgerufen werden (Kapitel 1.2). Entwicklungen wie das Nowcasting-System können zur Verbesserung des Kraftwerksbetriebs beitragen. Jedoch ist für die Bewertung der Verwendbarkeit von Strahlungskarten eine ausführliche Untersuchung des Kraftwerkverhaltens sowie dessen Regelung unter Einfluss zeitlicher und räumlicher Variabilität des DNI notwendig.

Das verwendete Simulationsmodell wird zu Beginn dieses Kapitels präsentiert. Die Besonderheiten des Modells werden aufgezeigt, die mathematischen Zusammenhänge vorgestellt und die Anwendung des Modells erläutert. Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels wird das Regelungsziel formuliert, der Stand der Technik des Regelkonzepts eines kommerziellen Parabolrinnenkraftwerks anhand der Simulationsumgebung dargelegt und die Regelungsprobleme aufgezeigt.

2.1. Simulationsmodell

In der Literatur ist eine Vielzahl an Modellen vorzufinden, die versucht, das Verhalten eines Parabolrinnenkraftwerks abzubilden. Diese sind jedoch für die Bewertung der Strahlungskarten unzureichend, da keine vollständige, sondern oftmals nur eine eingeschränkte Analyse des Verhaltens, z. B. eines einzelnen Loops, ermöglicht wird.

Das Modell von Hirsch und Schenk in [19] verwendet einen etwas ausführlicheren Ansatz. Durch Modellierung der Hauptkomponenten in Modelica/Dymola wird das Verhalten eines Parabolrinnenkraftwerks während Wolkenzügen beschrieben. Wie zuvor erwähnt werden auch hier die Auswirkungen von Wolkenzügen auf lediglich

einen Loop untersucht. Das ermittelte Verhalten des untersuchten Loops wird jedoch als repräsentativ für alle Loops des Solarfeldes angesehen [20]. Folglich wird die Annahme getroffen, das Feld werde permanent homogen bestrahlt, sodass der Effekt von orts aufgelöster Strahlung nicht berücksichtigt wird. Der Ansatz von Hirsch und Schenk lässt eine vereinfachte Analyse von Einflüssen durch Wolken zu, doch beschreibt das Modell die Auswirkungen für eine detaillierte Untersuchung nicht ausreichend.

Aus diesem Grund entwickelte Noureldin in [21] Virtual Solar Field (VSF), ein numerisches Modell zur Beschreibung des gesamten Parabolrinnenkraftwerkverhaltens. Dazu macht das Modell Gebrauch von thermischen und hydraulischen Gleichungen. Auf Basis dieser Gleichungen ist VSF in der Lage, den Temperaturverlauf jedes Loops sowie die Feldaustrittstemperatur während jeglicher Wolkenzüge zuverlässig zu simulieren. Zusätzlich lässt die Simulationsumgebung zahlreiche Anpassungen für verschiedene Simulationsintentionen zu und ermöglicht eine umfangreiche Auswertung durch zahlreiche Ausgabeparameter. Die Regelung der Ausgangstemperatur des Feldes sowie die der Ausgangstemperaturen der Loops werden in VSF identisch zu der eines kommerziellen Parabolrinnenkraftwerks umgesetzt (Kapitel 1.2). Dabei greifen die integrierten Regelungsalgorithmen direkt in die Simulation ein und ermöglichen durch Anpassung der Regelparameter eine Untersuchung unterschiedlicher Regelungsstrategien [22].

Aufgrund der Eigenschaften, die VSF besitzt, wird es zur Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Variabilität sowie der daraus folgenden Optimierung der Regelung verwendet. Letztlich ist VSF ein geeignetes Modell, um die Verwendbarkeit von Strahlungskarten auszuwerten.

2.1.1. Modellentwurf

Das in [21] vorgestellte VSF zeichnet sich primär durch eine Berechnung der hydraulischen und thermischen Anteile eines Parabolrinnenkraftwerks aus. Dazu koppelt VSF die hydraulischen und thermischen Gleichungen, die anschließend über das Runge-Kutta-Verfahren gelöst werden können.

Das Simulationsmodell zerlegt die Rohrkonstruktion eines modellierten Parabolrinnenkraftwerks in eine Schar von Rohren. Dadurch kann das thermische und hydraulische Verhalten der Wärmeträgerflüssigkeit innerhalb eines Rohres ermittelt und die Ergebnisse über Verknüpfungsgleichungen für die Untersuchung des nächsten Rohres verwendet werden. Somit durchläuft die Simulation während eines Zeitschrittes stückweise sämtliche Rohre des Kraftwerks, bis es letztlich zum Hauptrohr gelangt und sich die Austrittstemperatur bildet. Anschließend wiederholt sich der Zyklus für die Berechnung des nächsten Zeitschritts [23].

Dieser Ansatz ermöglicht einen Einblick in entscheidende Prozessparameter, also die einzelnen Loopaustrittstemperaturen sowie die Feldaustrittstemperatur. Die fundamentalen Größen zur Berechnung des Kraftwerkverhaltens bilden im Bereich der Hydraulik die Druckverluste, während bei der Thermik die Wärmeverluste sowie die Fluidtemperatur im Vordergrund stehen. Die Notwendigkeit einer Kopplung entsteht

aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung beider Bereiche. So weisen die Druckverluste eine signifikante Abhängigkeit von der Dichte¹ sowie der Viskosität des Fluids auf, die wiederum von der vorherrschenden Fluidtemperatur beeinflusst wird. Zeitgleich bestimmen die Druckverluste die Massenströme des Fluids und führen zu einer Beeinflussung der Temperatursteigerung an den Kollektoren. Die detaillierte Berechnung beider Bereiche ermöglicht es, das gesamte Kraftwerkverhalten mit einer hohen Genauigkeit zu simulieren. Zusätzlich ermöglicht die verwendete Modellierungsmethode eine Analyse der Auswirkung eines räumlich und zeitlich variablen DNI, da VSF jedes Absorberrohr individuell berechnet und dieses deswegen auch unterschiedliche Strahlung erfahren darf. Aus diesem Grund ist VSF in der Lage, einen Überblick über die orts aufgelösten Feldtemperaturen zu liefern, die durch unterschiedliche Bestrahlung des Feldes auftreten.

VSF - Hydraulischer Teil

Das Ziel der Berechnungen des hydraulischen Teils ist die Ermittlung des Massenstroms in den Rohrleitungen, der im Anschluss zur Lösung der thermischen Gleichungen verwendet wird. Eine große Herausforderung bei der Berechnung des Massenstroms stellen die variierenden Druckverluste zwischen abzweigenden Rohrleitungen dar. Denn diese führen zu unterschiedlichen Massenströmen in den beiden abgehenden Rohrzweigen [21].

Entstehende Druckverluste können über eine Verknüpfung der Darcy-Weisbach- und der Bernoulli-Gleichung berechnet werden.

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D_i} \frac{\rho_f}{2} \left(\frac{\dot{V}}{A} \right)^2 \quad (2.1)$$

Dabei beschreibt Δp den Druckverlust innerhalb des Rohrs, λ die Rohrreibungszahl, L die Länge des Rohres, D_i den Rohrrinnendurchmesser, ρ_f die Fluidichte, \dot{V} den Volumenstrom des Fluids und A die Querschnittsfläche des Rohrs [21]. Gemäß der vorliegenden Gleichung wird der Druckabfall zwar durch statische Faktoren, der Geometrie und dem Rohrmaterial, geprägt, eine Variation des Druckabfalls entsteht aber erst durch die Dichte und Viskosität. Denn diese unterliegen der Dynamik der Temperatur. Somit variieren die Druckunterschiede in den Rohren signifikant, wenn das Feld durch einen räumlich variablen DNI bestrahlt wird und in der Folge die Fluidtemperaturen in den Loops differieren.

Dieser Effekt tritt bei homogener Bestrahlung nur bedingt auf und wird in diesem Fall über an jedem Loop anliegende Druckventile manuell reduziert. Bei einer optimalen Einstellung der Ventile erreicht das Solarfeld ein hydraulisches Gleichgewicht, sodass sich ein identischer Massenstrom in jedem Loop einstellt.

Dieses Konzepts bedient sich VSF, indem es vor jeder durchgeführten Simulation über modellierte Druckventile ein hydraulisches Gleichgewicht erzeugt und somit

¹Die Fluidichte wird als Funktion der Temperatur auf Basis von Werten aus der Literatur angepasst.

bei normalen Bedingungen ein konstanter Massenstrom erreicht wird [21]. Aus diesem Grund entstehen unterschiedliche Druckverluste erst, sobald die Variabilität des DNI zunimmt. Das bedeutet, dass solange kein vermehrtes Aufkommen von Wolken herrscht, ein nahezu identischer Massenstrom durch alle Loops fließt.

Der Massenstrom innerhalb jedes Rohrs kann anschließend über die Gleichung 2.2 bestimmt und für das Lösen der thermischen Gleichung des Rohrs verwendet werden.

$$\Delta p = \frac{K_{p,total}}{\rho_f^2} \dot{m} |\dot{m}| \quad (2.2)$$

Hier beschreibt \dot{m} den gesuchten Massenstrom und $K_{p,total}$ die gesamten hydraulischen Verluste innerhalb des untersuchten Rohrs. Die hydraulischen Verluste werden anhand der Reynolds-Zahl und der Rohrreibungszahl über unterschiedliche Methoden, wie z. B. das Moody-Diagramm, bestimmt [21, 24].

VSF - Thermischer Teil

Das Ziel des thermischen Teils ist die Bestimmung der variierenden Wärmeträgerflüssigkeitstemperaturen T_f innerhalb des Solarfelds unter Verwendung der zuvor berechneten Massenströme. Hierzu wird der mathematische Zusammenhang zwischen dem DNI und dem Absorberrohr dargestellt sowie die Wechselwirkung des Absorberrohrs mit der Wärmeträgerflüssigkeit beschrieben.

Sobald das Fluid in den Loop strömt, kommt es zu einer Temperatursteigerung, die durch den Parabolrinnen-Kollektor hervorgerufen wird. Durch Fokussierung der Strahlung wirkt der DNI als spezifischer Wärmestrom \dot{q}_{sol} auf das Absorberrohr. Die Menge an zugeführter Wärme wird maßgeblich sowohl durch die Intensität der Strahlung als auch durch die Fokussierungsrate r definiert.

$$\dot{q}_{sol} = DNI \cdot \eta_{opt} \cdot IAM \cos \varphi \cdot r \cdot \eta_{endloss} \cdot w \quad (2.3)$$

Hier beschreibt η_{opt} den optischen Wirkungsgrad des Kollektors (Kapitel 1.2), IAM den Winkelkorrekturfaktor, φ den Höhenwinkel der Sonne, über den die Kosinusverluste abfallen, $\eta_{endloss}$ die Endverluste und w die Breite der Spiegelfläche [21].

Der Einfluss von \dot{q}_{sol} lässt sich anhand der Energiebilanz für das Absorberrohr ableiten. Diese beschreibt die zeitliche Veränderung der Temperatur als

$$\rho_w A_{CS} c_{pW} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \dot{q}_{sol} - \dot{q}_{loss} - \dot{q}_{conv} \quad (2.4)$$

mit ρ_w als Dichte des Absorbermaterials und c_{pW} als dessen spezifische Wärmekapazität, A_{CS} als Außenfläche des Absorberrohrs sowie T_w die Temperatur des Absorberrohrs [23]. Zudem treten Wärmeströme, beschrieben als \dot{q}_{loss} und \dot{q}_{conv} , auf. Dabei beschreibt \dot{q}_{loss} thermische Verluste des Absorberrohrs und \dot{q}_{conv} den konvektiven spezifischen Wärmestrom, der auf die Wärmeträgerflüssigkeit wirkt. Über diesen Wärmestrom wird die umgewandelte Solarenergie in Form von thermischer Energie im Fluid gespeichert. Der thermische Teil des Absorberrohrs beschränkt sich folg-

lich auf die Berechnung des spezifischen Wärmestroms \dot{q}_{conv} , der die Temperatur des Fluids beeinflusst:

$$\dot{q}_{conv} = \alpha_f \pi D_i (T_w - T_f) \quad (2.5)$$

Hier beschreibt α_f den Wärmeübertragungskoeffizienten.

Die Temperatur des Fluids kann, wie die des Absorberrohrs, durch eine Differentialgleichung erster Ordnung bestimmt werden. Die Energiebilanz für die Wärmeträgerflüssigkeit ist:

$$\rho_f \bar{c}_{v_f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + v_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) = \frac{\dot{q}_{conv}}{A_{conv}} \quad (2.6)$$

Hier beschreibt \bar{c}_{v_f} die spezifische Wärmekapazität des Fluids, v_f die Fluidgeschwindigkeit und A_{conv} die Fläche, über die der konvektive spezifische Wärmestrom auf das Fluid wirkt [23]. Nachdem die Differentialgleichung durch das Runge-Kutta-Verfahren gelöst wurde, kann auch die Geschwindigkeitsänderung über die Kontinuitätsgleichung berechnet werden. Hierzu vereinfacht Nouredin in [21] die Kontinuitätsgleichung des Fluids zu:

$$\frac{\partial v_f}{\partial x} = -\frac{1}{\rho_f} \frac{\partial \rho_f}{\partial T_f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + v_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) \quad (2.7)$$

Diese Gleichung beschreibt die räumliche Veränderung der Fluidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fluidtemperatur und der Dichte innerhalb des untersuchten Rohrs [21].

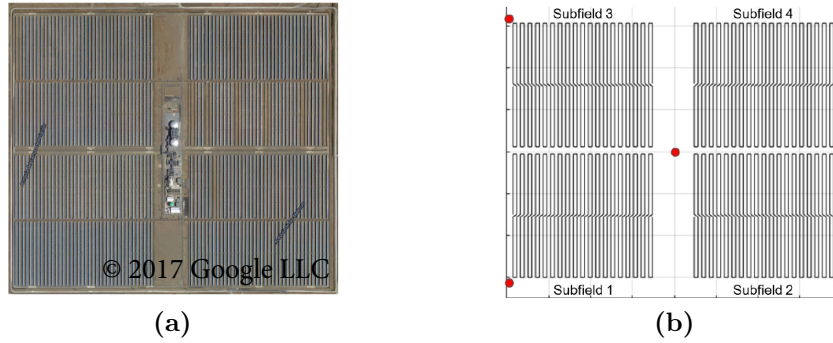
Es ist festzuhalten, dass das System mit Gleichung 2.4 und Gleichung 2.6 durch zwei gekoppelte Differentialgleichungen beschrieben wird. Beide Gleichungen sind für die Regelung von großer Bedeutung und werden in Kapitel 4 nochmals aufgegriffen und weiter untersucht.

VSF - Validierung

Das DLR publizierte in [24] Validierungsergebnisse des VSF. Darin vergleichen Nouredin et al. aufgezeichnete Messdaten aus dem Andasol-3 Kraftwerk mit reproduzierten Simulationsergebnissen des VSF. Um eine möglichst realitätsnahe Simulation des Kraftwerkverhaltens zu erreichen, wurde Andasol-3 mit seiner exakten Anzahl an Kollektorfeldern und Loops sowie entsprechender Dimensionierung der Rohre und der verwendeten Wärmeträgerflüssigkeit in VSF rekonstruiert. Sowohl die Funktion des Powerblocks als auch die des Salztank-Systems wurden hierbei vernachlässigt [24].

Für eine Simulation des aufgezeichneten Messtags benötigt VSF den an diesem Tag vorherrschenden DNI-Verlauf sowohl in zeitlicher als auch örtlicher Auflösung. Dadurch ist VSF in der Lage, das virtuell erzeugte Parabolrinnenkraftwerk in identischer Weise zu bestrahlen und über die mathematischen Gleichungen die Prozessparameter näherungsweise zu rekonstruieren. Eine fehlende Verfügbarkeit der Strahlungskarten führte zu der Notwendigkeit, den Verlauf des DNI für die Versuchstage über die Messdaten von fünf auf dem Solarfeld verteilten Pyrheliometerstationen

zu reproduzieren. Um eine orts aufgelöste Strahlung annähernd zu imitieren, wurden die Daten der Messstationen räumlich linear interpoliert. Einen Vergleich des Parabolrinnenkraftwerks mit dessen Nachbildung in VSF gibt Abbildung 2.1. Hier deuten die roten Markierungen die Positionen der Pyrheliometerstationen an. Diese befinden sich jeweils in den Ecken des Solarfeldes sowie die fünfte Station in der Mitte am Powerblock [24].



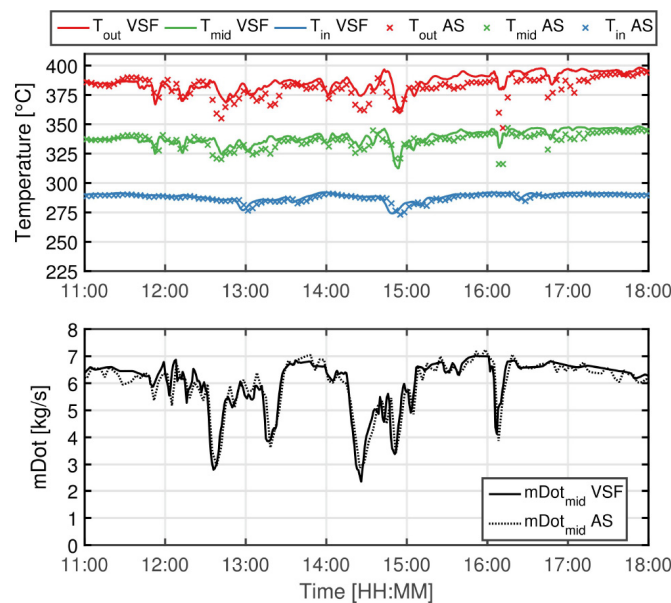
Quelle: [24]

Abbildung 2.1.: a) Satellitenaufnahme von Andasol-3 [Map data: Google, Inst. Geogr. Nacional]. b) Nachbildung der Kollektorfelder von Andasol-3 in VSF.

Innerhalb der Publikation wird das Simulationsmodell durch insgesamt fünf Versuche validiert. Zur Bewertung der Genauigkeit wie auch einer Verdeutlichung der Notwendigkeit von Strahlungskarten werden im Folgenden die Ergebnisse des ersten Versuchs vorgestellt und diskutiert. Hierbei vergleichen die Autoren die gemessene und simulierte Temperatur der Wärmeträgerflüssigkeit an drei unterschiedlichen Positionen innerhalb eines Loops sowie den gemessenen und simulierten Massenstrom, der durch diesen fließt. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wird der Massenstrom über den anliegenden Pumpdruck durch die Regelung beeinflusst, um die resultierende Austrittstemperatur des gesamten Kraftwerks auf einer Solltemperatur von 393 °C zu halten. Abbildung 2.2 stellt die Verläufe der Mess- und Simulationsergebnisse dar. Dabei repräsentieren die Linien die Simulationsergebnisse von VSF und die Kreuze die Messdaten des Andasol-3 Kraftwerks. Die im oberen Teil der Abbildung dargestellte blaue Kurve beschreibt die Eintrittstemperatur des Fluids in den Loop, die grüne Kurve die Temperatur in der Mitte des Loops und die rote Kurve die Austrittstemperatur des Loops. Dabei beschreibt die Temperatur an mittlerer Position den Zustand der Wärmeträgerflüssigkeit, nachdem es von zwei und die Temperatur an der Austrittsstelle, nachdem es von vier Parabolrinnen-Kollektoren bestrahlt wurde. Der untere Teil der Abbildung beschreibt den Verlauf des Massenstroms für Messung und Simulation.

Der simulierte Massenstrom verhält sich innerhalb der untersuchten Zeitspanne nahezu analog zu den Messwerten. Die Autoren führen die geringen Unterschiede auf Messfehler der verwendeten Druckmanometer zurück [24]. Bei den Temperaturen weist die simulierte Eintrittstemperatur ebenfalls ein nahezu identisches Verhalten zu den Messdaten auf. Hingegen entstehen bei der mittleren Temperatur und vor allem bei der Austrittstemperatur deutlichere Abweichungen. Zu Beginn reproduziert die Simulation die Messdaten mit hoher Genauigkeit. Erst bedingt durch einen abfal-

lenden DNI entsteht eine Differenz zwischen Messung und Simulation. Dieser Abfall lässt sich aus der Reduzierung des Massenstroms zur Stabilisierung der Austrittstemperatur des gesamten Solarfeldes circa zu den Zeitpunkten 12:30 Uhr, 14:30 Uhr und 16:05 Uhr ableiten. Zu diesen Zeitpunkten differieren die verglichenen Temperaturen zunehmend. Wenn der Verlauf des DNI einen konstanten Massenstrom zulässt, nimmt die Abweichung der Temperaturen deutlich ab. Dennoch zeigen sich an den abweichenden Stellen Gemeinsamkeiten im tendenziellen Verlauf der Temperaturen, denn sowohl bei der Messung als auch der Simulation sinken die Temperaturen zu identischen Zeiten. Lediglich das Ausmaß der Temperaturabnahme ist bei der Messung intensiver. Dieser Fehler kann durch den reproduzierten DNI ausgelöst werden, denn eine Rekonstruktion eines örtlich aufgelösten DNI durch eine räumlich lineare Interpolation ist nur bedingt möglich. Der so bestimmte durchschnittlich auf das Solarfeld wirkende DNI kann näherungsweise mit der Realität übereinstimmen, aber die örtliche Reduzierung des DNI durch Wolkenzüge nicht. Deshalb kann der untersuchte Loop geringere Strahlung erfahren haben als angenommen, sodass in der Folge die Kollektoren weniger Wärme auf das Fluid übertragen. Dies würde sich jedoch nicht im Verlauf des Massenstroms bemerkbar machen, da dieser als Stellgröße für die Stabilisierung der Austrittstemperatur des gesamten Solarfeldes angepasst wird.



Quelle: [24]

Abbildung 2.2.: Oben) Vergleich der gemessenen und simulierten Temperaturen innerhalb des untersuchten Loops. Unten) Vergleich des gemessenen und simulierten Massenstroms innerhalb des untersuchten Loops.

Trotz eines bedingt rekonstruierten DNI-Verlaufs und möglichen Messfehlern zeigt dieser Versuch eine hohe Genauigkeit des Simulationsmodells auf. Diese wäre jedoch unter Verwendung von Strahlungskarten, anstatt eines reproduzierten DNI noch höher ausgefallen. Das von Nouredin entwickelte VSF ermöglicht es, ein vollständiges Parabolrinnenkraftwerk nachzubilden und Prozessparameter, wie Temperatur und Massenstrom, zu untersuchen.

2.1.2. Modellanwendung

In der Validierung wurden die Probleme einer Simulation ohne genaue Informationen des orts aufgelösten DNI aufgezeigt. Die auf einem Solarfeld befindlichen Pyrheliometerstationen reichen nicht aus, um den orts aufgelösten DNI mit einer ausreichenden Genauigkeit zu beschreiben. An dieser Stelle helfen die Strahlungskarten des Nowcasting-Systems aus. Diese werden als Informationsquelle verwendet, um eine präzise Rekonstruktion des aufgezeichneten Tages zu ermöglichen. Durch die Kombination aus Strahlungskarten und VSF können die mit dem Nowcasting-System vermessenen Tage rekonstruiert und somit die Auswirkungen zeitlicher und räumlicher Variabilität untersucht werden (Abbildung 2.3a).

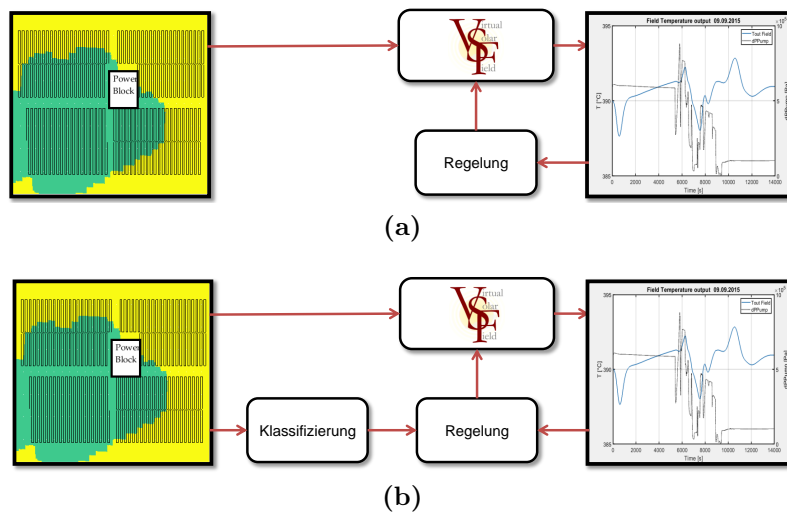


Abbildung 2.3.: a) Verwendung der Strahlungskarte zur Simulation in VSF. b) Verwendung der Strahlungskarte zur Simulation sowie für den Einsatz in der Regelung in VSF.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Strahlungskarte zur Optimierung der Regelung verwendet. Hierzu werden in Kapitel 3 Klassifizierungsverfahren entwickelt, die die räumliche und zeitliche Variabilität der Strahlungskarten in unterschiedliche Klassen einstufen. Anschließend werden die Klassen untersucht und aus den gewonnen Erkenntnissen Regelungsstrategien abgeleitet (Kapitel 4). Abbildung 2.3b stellt den Verarbeitungsprozess der Strahlungskarte dar. Dabei fungiert die Strahlungskarte in erster Linie als Eingabe für die Simulation von VSF. Zeitgleich wird die Strahlungskarte klassifiziert und die entsprechende Regelungsstrategie eingeleitet. Diese greift direkt in die Simulation von VSF ein und stabilisiert die Regelgrößen des Kraftwerks. Ein Vergleich zwischen der üblichen Regelung ohne Strahlungskarten (Abbildung 2.3a) und einer optimierten Regelung, die sich auf die Klassifizierung der Strahlungskarten stützt (Abbildung 2.3b), klärt zeitgleich die Frage der Verwendbarkeit von Strahlungskarten für den Einsatz in einer Regelung.

Die Auswertung dieser Arbeit bezieht sich dabei auf 30 vermessene Tage an der Plataforma Solar de Almería, jedoch werden diese auf das in VSF nachgebildete Parabolrinnenkraftwerk La Africana in Córdoba angewendet. Die erzeugten Strahlungskarten dieser 30 Tage weisen unterschiedlichste Wolkenbedingungen auf, sodass

sowohl Tage mit klarem Himmel als auch stark bewölkte Tage untersucht und optimiert werden können.

2.2. Regelung eines Parabolrinnensystems am Beispiel von VSF

2.2.1. Formulierung des Regelungsziels

Ein Parabolrinnenkraftwerk erzeugt den größtmöglichen Ertrag an elektrischem Strom, wenn eine optimale Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgerflüssigkeit und Prozessdampf vorliegt. Dadurch wird der benötigte Prozessdampf optimal erzeugt, so dass dieser die Turbine effizient antreiben kann (Kapitel 1.2). Damit das Parabolrinnenkraftwerk diesen größtmöglichen Ertrag generiert, werden die Prozesse durch die Regelung stabilisiert und im Sinne einer Ertragsmaximierung kontrolliert.

Gleichung 2.8 zeigt den mathematischen Zusammenhang des an den Dampf übertragenen Wärmestroms $\dot{Q}_{\text{tauscher}}$ und der am Wärmetauscher vorherrschenden Temperaturdifferenz ΔT_{WT} . Eine Austrittstemperatur des Solarfelds unterhalb des Sollwerts verringert demnach den erzeugten Wärmestrom. Jedoch wird der Wärmestrom nicht nur durch die Temperaturdifferenz, sondern auch durch die spezifische Wärmekapazität \bar{c}_{v_f} sowie den Massenstrom des Fluids m_f bestimmt. Letzteres kann, wie in der Validierung aufgezeigt wurde, aufgrund der Auswirkung eines variablen DNI über die Regelung reduziert werden, um die Austrittstemperatur des Solarfelds zu stabilisieren (Gleichung 1.1). Da für eine optimale Sollwert-Folge eine drastische Beeinflussung des Massenstroms notwendig ist, kann es trotz einer Stabilisierung der Austrittstemperatur zu einem geringeren Ertrag des Parabolrinnenkraftwerks kommen. Dieser Zwiespalt zwischen der Erhaltung einer Solltemperatur und der Konsequenz einer Drosselung des Massenstroms ist eine Problematik in der Festlegung der Regelziele und der Bewertung der Regelgüte des Reglers.

$$\dot{Q}_{\text{tauscher}} = m_f \bar{c}_{v_f} \Delta T_{WT} \quad (2.8)$$

Eine ähnliche Problematik stellt sich bei der Stellgröße Fokussierung dar. Da eine Defokussierung mit einem potenziellen Verlust von Solarenergie einhergeht, ist es im Sinne einer optimalen Energieumwandlung, eine maximale Fokussierung aufrecht zu erhalten. Solange das Feld mit einem homogenen DNI bestrahlt wird und die Looptemperaturen nicht differieren, ist eine Regelung aller Temperaturen durch den Massenstrom realisierbar. Sobald aber die Kollektorfelder durch einen orts aufgelösten DNI bestrahlt werden, variieren die Looptemperaturen und eine Beschränkung der Stellgrößen auf den Massenstrom ist nicht mehr möglich. Hier müssen die Kollektoren defokussieren, um die Wärmeträgerflüssigkeit vor Überhitzung zu schützen. Damit auch unter diesen Bedingungen nur geringe Verluste an Solarenergie vorherrschen, ist eine Regelabweichung der Fluidtemperatur innerhalb der Loops zulässig, solange die Fluidtemperatur nicht über 398 °C steigt. Auch dieser Ansatz widerspricht der Zielsetzung eines Reglers, da die Minimierung der Regelabweichung nur sekundäre Priorität aufweist. Folglich ist das Regelziel nicht auf die Stabilisierung

der Temperaturen beschränkt, sondern diese soll unter Berücksichtigung einer hohen Fokussierungsrate aller Kollektoren sowie eines möglichst hohen Massenstroms im Solarfeld erreicht werden. Dazu soll die Austrittstemperatur des Solarfeldes im Sinne des mathematischen Zusammenhangs in Gleichung 2.8 stabil sein und die Looptemperaturen unterhalb des festgelegten Grenzwerts von 398 °C gehalten werden. Dementsprechend ist der Stand der Technik der Regelung in kommerziellen Kraftwerken mehr auf den Ertrag ausgelegt als auf eine Reduzierung der Regelabweichungen. Da das Konzept eines Reglers darauf basiert, die Regelgröße der Führungsgröße anzupassen, greifen die Betreiber der Parabolrinnenkraftwerke in den Prozess ein und erhöhen Massenstrom und die Fokussierung der Kollektorfelder manuell.

2.2.2. Beschreibung der Reglerelemente

Regelung - Austrittstemperatur des Solarfelds

Die Regelstruktur der Austrittstemperatur ist über das Blockschaltbild in Abbildung 2.4 dargestellt. Dabei unterteilt sich die Regelung in einen geschlossenen Regelkreis, eine Vorsteuerung sowie eine manipulative Vorsteuerung. Den primären Anteil der Regelung übernimmt der geschlossene Regelkreis. Hier wird die Austrittstemperatur des Solarfelds $T_{SF,out}$ gemessen, zurückgeführt und mit der Führungsgröße T_{SF} verglichen. Es bildet sich eine Regelabweichung $e_{T_S}(t)$. Ein PI-Regler korrigiert diese durch Ausgabe der benötigten Pumpdruckdifferenz Δp_δ . Die ermittelte Stellgröße wirkt direkt auf das Kraftwerkverhalten. Es resultiert ein bestimmter Massenstrom des Fluids sowie eine veränderte Austrittstemperatur des Solarfelds. Letztere wird erneut gemessen, zurückgeführt und der Regelungsprozess wiederholt sich.

Der Zusammenhang zwischen Regelabweichung $e_{T_S}(t)$ und Stellgröße Δp_δ ist über die Gleichung des PI-Reglers beschrieben.

$$\Delta p_\delta = K_c e_{T_S}(t) + \frac{K_c}{T_p} \int e_{T_S} dt \quad (2.9)$$

Hier repräsentiert K_c den proportionalen Verstärkungsfaktor und T_p die Nachstellzeit [25]. Der proportionale Verstärkungsfaktor mit der Einheit $\frac{^\circ C}{Pa}$ beschreibt das lineare Verhältnis zwischen einer Änderung des Pumpdrucks und der resultierenden Änderung der Austrittstemperatur des Felds. Durch eine wechselhafte Bestrahlung variiert dieses Verhältnis ständig, sodass eine Regelung mittels eines konstanten proportionalen Verstärkungsfaktors nicht ausreicht. Abbildung 2.5a verdeutlicht diese These. Der verwendete PI-Regler wurde über die Methode von Ziegler-Nichols für einen konstanten DNI von $400 \frac{W}{m^2}$ ausgelegt. Es zeigt sich, dass das durch den proportionalen Verstärkungsfaktor angenommene Verhältnis zwischen Temperatur und Pumpdruck für abweichende DNI-Werte nicht mehr zutreffend ist. Eine hohe Variabilität des DNI wirkt sich als Störung auf die Regelstrecke aus und führt zu einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Austrittstemperatur und Pumpdruck. Folglich kann die Regelabweichung nicht mehr optimal ausgeregelt werden. Um dieses

gelung der Austrittstemperatur wird dementsprechend adaptiv von der derzeitigen Dynamik des Kraftwerks abgeleitet. Die Auswirkung einer adaptiven Regelung zeigt ein Vergleich der Abbildungen 2.5a und 2.5b. Die Austrittstemperatur des Solarfelds wird wesentlich schneller und zeitgleich unabhängig vom DNI an die vorgegebene Führungsgröße angepasst. Dementsprechend führt die Verwendung eines adaptiven Reglers zu einer Verbesserung der Regelgüte.

Die Stellgröße des Pumpdrucks ist aus technischen Gründen begrenzt, sodass sich ein maximaler Pumpdruck p_{max} und ein minimaler Pumpdruck p_{min} ergibt. Im Falle eines bereits maximal oder minimal anliegenden Pumpdrucks bei einer verbleibenden Regelabweichung ist eine Folge der Führungsgröße unter den vorherrschenden Strahlungsbedingungen nicht mehr möglich. Die über das Integral $\int e_{T_s} dt$ berechnete Fläche wird über die Dauer der Regelabweichung stetig größer. Verändern sich die Strahlungsbedingungen, sodass eine Folge der Führungsgröße wieder möglich ist, beeinflussen die aufsummierten integralen Anteile den PI-Regler. In der Folge kann der Regler keine optimale Stellgröße einstellen, ohne zuvor die summierten integralen Anteile zu kompensieren. Um ein Aufsummieren des integralen Anteils während einer unvermeidbaren Regelabweichung zu verhindern, wird ein Anti-Reset-Windup (ARW) verwendet.

Zusätzlich nutzt die Regelung eine Vorsteuerung (siehe Abbildung 2.4: FF loop). Diese berechnet den in Abhängigkeit des auftretenden DNI theoretisch notwendigen Massenstrom. Der bestimmte Massenstrom wird über die Symsternkurve der Pumpe ausgewertet, um den benötigten Pumpdruck zu ermitteln, der zusätzlich zu der gestellten Druckdifferenz des adaptiven Reglers addiert wird. Die verwendete Gleichung zur Berechnung des theoretischen Massenstroms gibt die Gleichung 2.11.

$$\dot{m}_{req} = \frac{\dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{loss}}{\bar{c}_p \Delta T_{field}} \quad (2.11)$$

Hier beschreibt \dot{m}_{req} den theoretisch notwendigen Massenstrom, \bar{c}_p die durchschnittliche spezifische Wärmekapazität des Fluids im Solarfeld und ΔT_{field} die notwendige Temperatursteigerung des Fluids zwischen Feldeintritt und Feldaustritt [25]. Zur Berechnung des Wärmestroms \dot{Q}_{sol} werden, wie beim adaptiven Regler, die vorhandenen Pyrheliometerstationen zur Messung des DNI verwendet. Solange der berechnete theoretische Massenstrom näherungsweise mit dem tatsächlich notwendigen Massenstrom übereinstimmt, ist lediglich eine geringe Justierung der Regelung notwendig. Wenn die Vorsteuerung den exakt benötigten Pumpdruck ausgibt, läuft die vom PI-Regler ausgegebene Druckdifferenz gegen Null. Jedoch muss die adaptive Regelung dem fehlerhaft approximierten Massenstrom entgegenwirken, sobald der mathematische Zusammenhang der Vorsteuerung die Realität nicht mehr abbildet. Folglich unterstützt die Vorsteuerung den geschlossenen Regelkreis. Eine negative Beeinträchtigung ist aber möglich, wenn der ermittelte durchschnittliche DNI durch steigende räumliche Variabilität von der Realität abweicht.

Die in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen wirtschaftlichen Regelziele können durch die Ergänzung einer weiteren Vorsteuerung (siehe Abbildung: Focus FB Loop) erreicht werden. Diese manipuliert die Regelabweichung der Austrittstemperatur des Solarfelds, sobald nicht alle Kollektoren des Solarfelds vollständig fokussieren. Dazu

erzeugt die Vorsteuerung unter Verwendung eines PI-Reglers eine zusätzliche Regelabweichung Δe_{T_S} .

$$\Delta e_{T_S} = K_c e_F(t) + \frac{K_c}{T_p} \int e_F(t) dt \quad (2.12)$$

Dabei beschreibt e_F die Differenz zwischen maximal möglicher Fokussierung und aktueller Fokussierung [25]. Die vom Regler erzeugte Regelabweichung wird auf die eigentlich vorherrschende Regelabweichung addiert. Durch die manipulierte Regelabweichung stellt der adaptive Regler einen höheren Pumpdruck als benötigt, sodass die Austrittstemperatur des Feldes unter den Wert der Führungsgröße sinken würde. Eine steigende Fokussierung der Kollektoren kompensiert diese Auswirkung. Die Vorsteuerung beeinflusst demnach die Stellgröße des Pumpdrucks, um eine Erhöhung der Fokussierungsrate zu erzwingen. Somit wandelt das Parabolrinnenkraftwerk mehr Solarenergie bei einem zeitgleich höheren Massenstrom um und der Ertrag an gewonnener elektrischer Leistung steigt. In einem kommerziellen Parabolrinnenkraftwerk steigert der Betreiber den Massenstrom manuell, sodass die Kollektoren eine höhere Fokussierungsrate einstellen können. Durch die Einführung dieser zusätzlichen Vorsteuerung in VSF kann der Eingriff des Betreibers simuliert werden. Dabei wird der proportionale Verstärkungsfaktor, wie beim adaptiven Regler, über Gleichung 2.10 berechnet. Jedoch ist der Verstärkungsfaktor hier konstant eingestellt. Die Gleichung ermöglicht allerdings eine Anpassung des Reglerverhaltens, sodass der Regler sehr aggressiv oder auch sehr konservativ agieren kann. Diese Funktion ist für die Optimierung des Reglers in Kapitel 4 von großer Bedeutung.

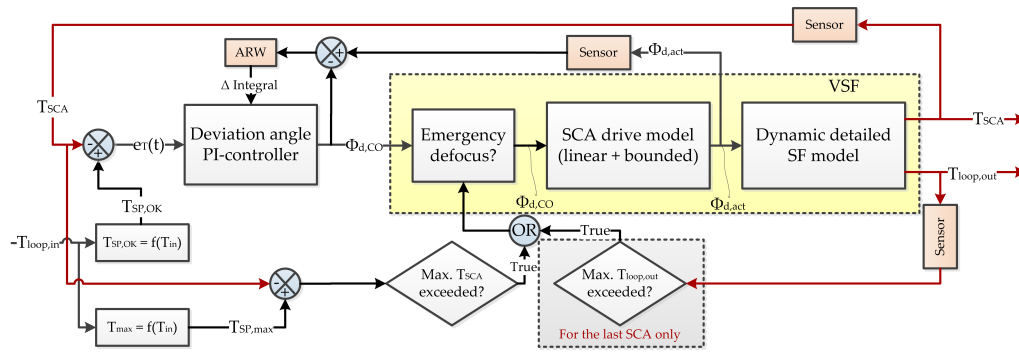
Regelung - Austrittstemperatur des Loops

Das Blockschaltbild für die Regelstruktur der Looptemperaturen ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Innerhalb eines Loops bilden sich insgesamt vier geschlossene Regelkreise. Diese regeln die gemessene Fluidtemperatur in der Mitte eines jeden Parabolrinnen-Kollektors T_{SCA} . Die Führungsgrößen $T_{SP,OK}$ der Regelkreise leiten sich aus der Annahme einer linearen Temperatursteigerung zwischen Loopeintritt und Loopaustritt ab. So ist die Anforderung, eine gleichmäßige Temperatursteigerung in jedem Kollektor zu erreichen (Abbildung 2.7). Bei jedem dieser vier Regelkreise wird T_{SCA} zurückgeführt und mit der entsprechenden Führungsgröße verglichen, sodass sich eine Regelabweichung $e_{T_K}(t)$ bildet. Die Regelabweichung wird über einen PI-Regler korrigiert, indem dieser eine entsprechende Änderung des Kollektorkwinkels $\Delta\Phi_{d,CO}$ einstellt. Die Anpassung der Stellgröße greift in die Regelstrecke ein und beeinflusst sowohl die Regelgröße T_{SCA} als auch die Loopaustrittstemperatur $T_{loop,out}$. Anschließend werden die Temperaturen in der Mitte des Kollektors erneut gemessen, zurückgeführt und der Regelvorgang wiederholt sich.

Der verwendete PI-Regler ist in Gleichung 2.13 beschrieben [25].

$$\Delta\Phi_d = K_c e_{T_K}(t) + \frac{K_c}{T_p} \int e_{T_K}(t) dt \quad (2.13)$$

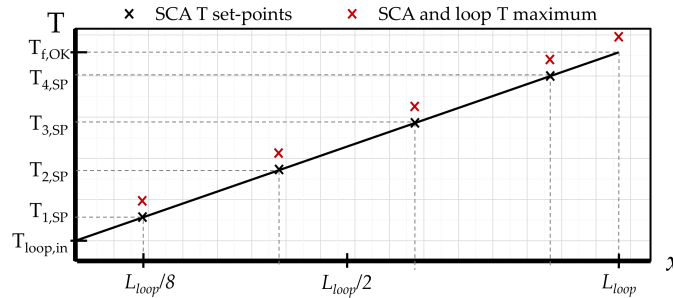
Der proportionale Verstärkungsfaktor wird, wie beim adaptiven Regler, über Gleichung 2.10 bestimmt. Statt einer adaptiven Berechnung, wird jedoch die Annahme



Quelle: [25]

Abbildung 2.6.: Blockschaltbild der Fokussierungsregelung innerhalb eines Loops.

eines näherungsweise konstanten Verhältnisses zwischen der Temperatur und der Fokussierungsrate des Kollektors getroffen [25]. So ist auch hier über T_c das Verhalten des Reglers von sehr aggressiv bis sehr konservativ einstellbar.



Quelle: [25]

Abbildung 2.7.: Darstellung der vier Kollektor-Führungsgrößen innerhalb eines Loops.

Bei der Regelung der Looptemperatur kommt es im Falle einer Regelabweichung trotz vollständiger Fokussierung des Kollektors zu einer Aufsummierung der integralen Anteile des PI-Reglers. Um diesen Effekt zu verhindern, wird ebenfalls ein ARW verwendet. Zur Absicherung der Prozesssicherheit werden sowohl $T_{loop,out}$ als auch T_{SCA} mit einer festgelegten Maximaltemperatur verglichen (Abbildung 2.7), sodass bei einer Überschreitung der Grenzwerttemperatur eine Nofalldefokussierung eingeleitet werden kann.

2.2.3. Herausforderungen der Regelung

Parameter der Referenzregelung

Die während der Validierung von VSF verwendeten Regelparameter sind in Tabelle 2.1 aufgeführt. Diese sind für die Regelung in VSF voreingestellt und gelten als Referenz, um die im Laufe der Arbeit unter Verwendung der Strahlungskarte optimierten Regelansätze vergleichen zu können.

Regelung - Problematik

Tabelle 2.1.: Regelparameter der Referenzregelung für die Regelung der Austrittstemperatur des Solarfeldes und die Regelung der Austrittstemperatur eines Loops.

Regelung	Parameter	Wert
Adaptive Pumpregelung	K_p, T_p	adaptiv
	θ_p	Simulationszeit
	Verhalten	aggressiv
FB Loop Vorsteuerung	K_p	3 $\frac{\%}{^\circ C}$
	T_p	160 s
	θ_p	abh. vom Pumpdruck ²
	Verhalten	aggressiv
Fokussierungsregelung	K_p	-8 $\frac{^\circ C}{deg}$
	T_p	5 s
	θ_p	Simulationszeit
	Verhalten	moderat

Der auf die Kollektoren auftreffende DNI kann aufgrund von optischen Verlusten nicht vollständig auf die Wärmeträgerflüssigkeit konzentriert werden. Der effektiv genutzte Anteil des DNI, G_{eff} ($G_{eff} = \cos\varphi \cdot IAM$), ist in Abbildung 2.8a gegen die Zeit aufgetragen. Die Abbildung zeigt den Verlauf des von den Kollektoren effektiv fokussierten maximalen, minimalen und durchschnittlichen DNI in $\frac{W}{m^2}$ für den 9. September 2015 über eine Zeitspanne von circa neun Stunden. Der obere Teil der Abbildung 2.8b beschreibt die aufgrund von G_{eff} entstehende maximale, minimale und durchschnittliche Austrittstemperatur des Fluids aus den Loops sowie die resultierende Austrittstemperatur aus dem Solarfeld über die Zeit in Grad Celsius. Dabei kennzeichnet die rote gestrichelte horizontale Linie die maximale Fluidtemperatur. Sobald das Fluid über diese Grenze steigt, wird automatisch eine Notfalldefokussierung der Kollektoren innerhalb des Loops ausgeführt. Die blau gestrichelte horizontale Linie beschreibt die minimal zulässige Austrittstemperatur aus einem Loop. Dieser Grenzwert ist nur zur Verbesserung der Vergleichbarkeit unterschiedlicher Regelungen eingefügt und findet keine Berücksichtigung bei der Bewertung der Regelung. Dennoch ist eine Unterschreitung dieses Grenzwertes nicht im Sinne des optimalen Betriebs eines Parabolrinnenkraftwerks, da es bei einem Temperaturabfall und einem unmittelbaren Temperaturanstieg zu thermischen Spannungen kommt. Der untere Teil der Abbildung stellt sowohl die gemittelte Fokussierungsrate aller Kollektoren in Prozent als auch die Anzahl überhitzter und unterkühlter Loops über die Zeit dar. Der obere Teil der Abbildung 2.8c zeigt den Verlauf des tatsächlichen Massenstroms sowie den über die Vorsteuerung berechneten theoretischen Massenstrom am Feldeintritt in $\frac{kg}{s}$ über die Zeit. Die untere Abbildung beschreibt den Verlauf der resultierenden Austrittstemperatur des Fluids aus dem Solarfeld über die Zeit in Grad Celsius. Hier kennzeichnet die blau gestrichelte horizontale Linie die Sollwerttemperatur von 393 $^\circ C$. Der gesamte Tag wurde durch den Referenzregler

geregelt, sodass die entstehenden Problematiken mögliche Optimierungspunkte für die Verbesserung des Reglers darstellen.

Für die ersten zweieinhalb Stunden beschreibt G_{eff} mit einem durchschnittlichen Wert von $750 \frac{W}{m^2}$ den Verlauf des DNI während Clearsky (Abbildung A.2a und A.2b im Anhang). Dementsprechend liegt keine zeitliche sowie räumliche Variabilität des DNI vor. Dennoch unterliegen die Looptemperaturen sowie die Feldaustrittstemperatur starken Schwingungen. Der Regler schafft es trotz Clearsky innerhalb von zweieinhalb Stunden nicht, die Temperatur zu stabilisieren. Dies liegt hauptsächlich daran, dass für die Regelung von Clearsky-Bedingungen ein zu aggressives Verhalten des adaptiven Massenstromreglers eingestellt ist (Tabelle 2.1). Diese Einstellung ist jedoch notwendig, um bei hoher zeitlicher Variabilität die Austrittstemperatur zu stabilisieren. Die Überdimensionierung des proportionalen Verstärkungsfaktors zeigt sich ebenfalls im Massenstrom. Der Regler ist nicht in der Lage, den optimalen Pumpdruck zu liefern, sodass auch der Massenstrom für ungestörte Bedingungen zu starke Schwankungen aufweist.

Die Auswirkung eines DNI mit hoher zeitlicher Variabilität zeigt sich zwischen zweieinhalb und viereinhalb Stunden (Abbildung A.2c und A.2d im Anhang). Durch die wechselhafte Beschattung der Kollektoren beginnen die Looptemperaturen zu schwingen. Gleichzeitig erfährt das Solarfeld auch eine räumliche Variabilität. Diese ist vor allem zwischen zweieinhalb und drei Stunden sowie vor der vierten Stunde stärker ausgeprägt. Zu den Zeiten, zu denen G_{eff} eine hohe räumliche Variabilität aufweist, differieren die Looptemperaturen, die durch die zeitliche Variabilität ohnehin schon nicht stabilisiert werden können, zunehmend. Die maximale Looptemperatur steigt ständig über den oberen zulässigen Grenzwert. Die Folge ist eine Überhitzung der Wärmeträgerflüssigkeit innerhalb der Loops. Dies schlägt sich in der Fokussierungsrate nieder, da es wiederholt zu Notfalldefokussierungen kommt. Die abrupte Defokussierung bewirkt eine erhöhte Regelabweichung in der Austrittstemperatur. Da die Anzahl überhitzter Loops jedoch gering ist, kann eine hohe gemittelte Fokussierungsrate unter dem Einfluss der hohen Variabilität gehalten werden.

Zwischen viereinhalb und siebeneinhalb Stunden nimmt die zeitliche und räumliche Variabilität des DNI deutlich ab. G_{eff} ist besonders zwischen viereinhalb und fünfeinhalb Stunden relativ konstant auf einem niedrigen Niveau. Dies deutet auf eine vollständige Beschattung des Solarfelds durch eine Wolkendecke³ hin (Abbildung A.2e und A.2f im Anhang). Durch den konstanten DNI können die Looptemperaturen sowie die Austrittstemperatur stabilisiert werden, sodass sich eine geringere Regelabweichung bildet. Dennoch weist die Austrittstemperatur des Solarfelds noch immer eine geringe Schwankung auf.

Gegen Ende des Tages nimmt die räumliche und zeitliche Variabilität nochmals zu. Die Looptemperaturen des Solarfelds differieren erneut signifikant, es kommt zu Notfalldefokussierungen und die Schwankungen der Austrittstemperatur nehmen wieder zu. Ab der siebten Stunde weist der Verlauf der Austrittstemperatur eine

³Eine vollständige Beschattung des Solarfelds durch eine Wolkendecke wird im weiteren Verlauf als Overcast bezeichnet.

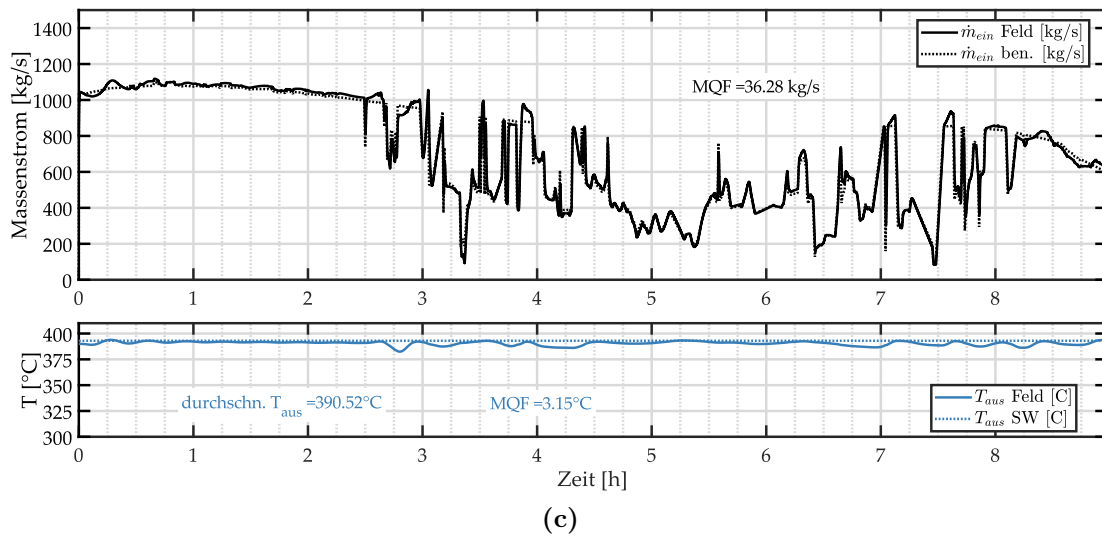
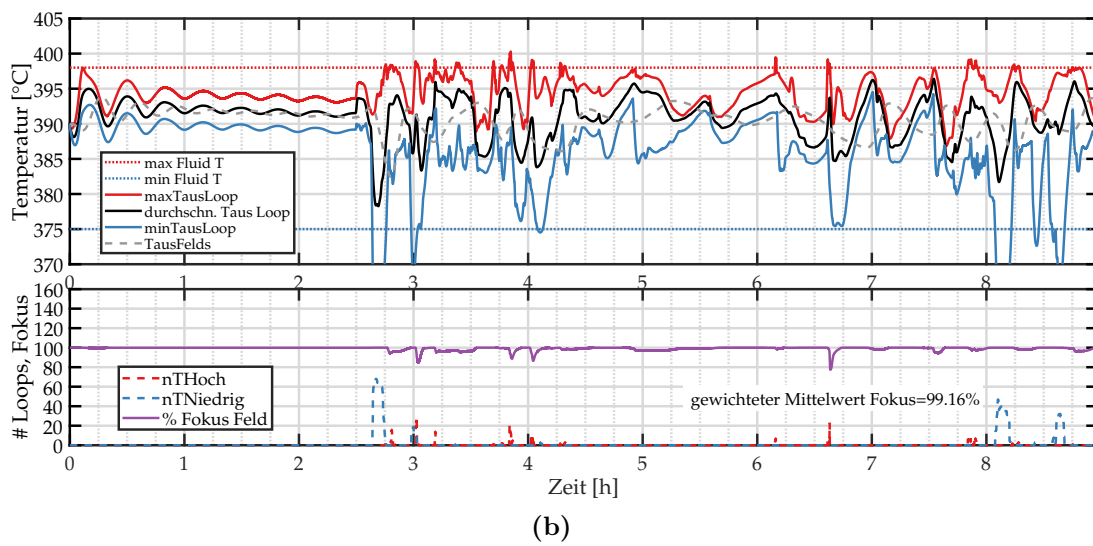
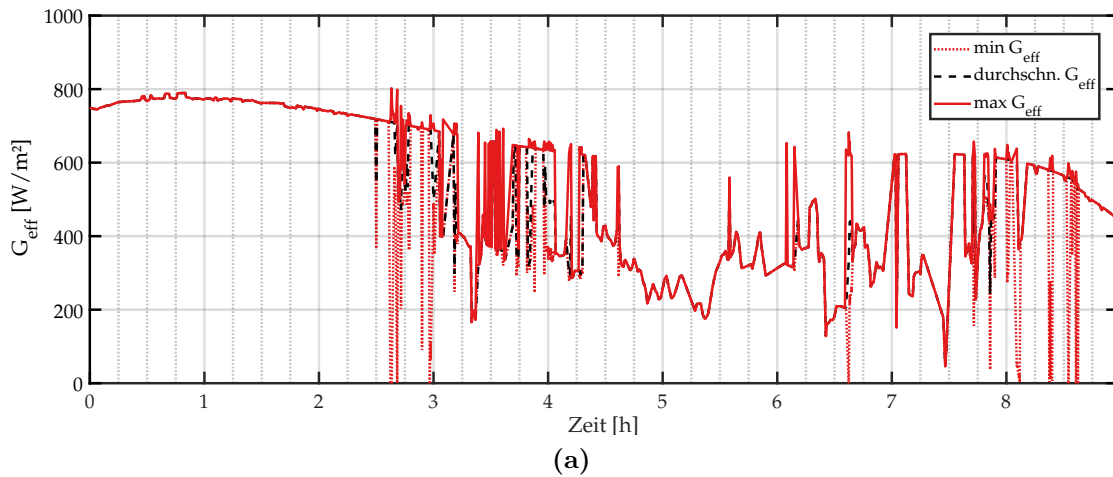


Abbildung 2.8.: Darstellung der VSF-Simulation für den 09.09.2015 a) Effektiver DNI über die Zeit. b) (oben) Maximale, minimale und durchschnittliche Looptemperatur sowie Austrittstemperatur aus dem Solarfeld über die Zeit. (unten) Fokussierungsrate und Anzahl überhitzter und unterkühlter Loops über die Zeit. c) (oben) tatsächlicher Massenstrom sowie berechneter theoretischer Massenstrom am Solarfeldeintritt. (unten) Austrittstemperatur am Solarfeldaustritt.

Dauerschwingung auf. Die Regelung kann die Looptemperatur unter Einfluss der Störungen nicht mehr kontrollieren, sodass diese überhitzen.

Unabhängig von der Tatsache, dass der Regler durch sein aggressives Verhalten nicht in der Lage ist, die Austrittstemperatur des Felds während Clearsky zu stabilisieren, führen die Bereiche, in denen die zeitliche Variabilität hoch ist, ebenfalls zu signifikanten Schwankungen in der Austrittstemperatur. Durch das aggressive Verhalten des Reglers kann die Temperatur unabhängig vom DNI kaum der Führungsgröße folgen (mittlere quadratische Fehler beträgt $3,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Die zusätzlich auftretende räumliche Variabilität führt vermehrt zu differierenden Looptemperaturen, sodass die Wärmeträgerflüssigkeit in den Loops, die einen hohen DNI erfahren, überhitzt und in den anderen unterkühlt. Eine hohe räumliche Variabilität zwingt die Kollektoren zu einer Defokussierung, damit die die Loops nicht überhitzen. So kommt es über den Tag zu insgesamt 92 notwendigen Notfalldefokussierungsprozessen. Dies hat zur Folge, dass die Austrittstemperatur wiederholt sinkt. Über den gesamten Tagesverlauf weist der Regler zu keinem Zeitpunkt eine hohe Regelgüte auf. Im Hinblick auf die Fokussierung ist ein Mittelwert von 99,16 % jedoch beachtlich, sodass das eigentliche Ziel nämlich ein hoher Ertrag sichergestellt wird.

Regelung - Optimierungspunkte

Nach einer Untersuchung der Regelung anhand eines repräsentativen Tags in Spanien zeigt sich, dass der Regler während aller vorherrschenden Bedingungen Verbesserungspotenzial aufweist. Dadurch lassen sich folgende Anforderungen für die Optimierung der Regelung unter Verwendung von Strahlungskarten formulieren:

- **Clearsky:** Der Regler sollte in der Lage sein, während eines nahezu konstanten DNI die Regelabweichung vollständig zu minimieren.
- **Zeitliche Variabilität:** Der Regler sollte in der Lage sein, während einer erhöhten zeitlichen Variabilität des DNI die Austrittstemperatur zu stabilisieren.
- **Räumliche Variabilität:** Der Regler sollte in der Lage sein, während einer erhöhten räumlichen Variabilität des DNI die Notwendigkeit von Notfalldefokussierungen möglichst zu vermeiden.
- **Ertrag:** Der Regler sollte in der Lage sein, neben Berücksichtigung einer hohen Regelgüte eine zusätzliche Steigerung des Ertrags herbeizuführen.

Teil II.

Hauptteil

Klassifizierung von Strahlungskarten

Die Strahlungskarte beschreibt den zeitlich und räumlich aufgelösten DNI, der auf das Solarfeld wirkt. Dementsprechend enthält die Strahlungskarte Informationen über die individuelle Bestrahlung eines jeden Loops. Aufgrund der Tatsache, dass das Fluid im gesamten Solarfeld nur durch eine einzige Pumpe angetrieben und so der Massenstrom innerhalb jedes Loops vom anliegenden Pumpdruck beeinflusst wird, kann das Potential dieser Information jedoch nicht vollständig Verwendung finden. Wäre zusätzlich zur Fokussierungsrate auch der Massenstrom innerhalb jedes Loops individuell einstellbar, könnte durch Entstehung einer orts aufgelösten Regelung jeder Loop für sich geregelt werden. Dies hätte zur Folge, dass die Austrittstemperatur eines jeden Loops ausschließlich durch den individuell eingestellten Massenstrom geregelt werden könnte, da die Informationen der Strahlungskarte theoretisch eine frühzeitige Anpassung an den vorhergesagten DNI ermöglichen. Somit würde sich der maximal mögliche Massenstrom in allen Loops einstellen, lediglich die von einer Störung betroffenen Loops müssten reagieren und den Massenstrom anpassen. Zeitgleich wäre die Stellgröße der Fokussierungsrate nahezu irrelevant, da sie die Strahlung stets vollständig fokussieren könnte. Jedoch wird der Massenstrom in kommerziellen Parabolrinnenkraftwerken nur durch den anliegenden Pumpdruck am Powerblock bestimmt, sodass die Information, welcher Loop welche Strahlung erfährt, nicht berücksichtigt werden kann. Folglich muss das Parabolrinnenkraftwerk durch den Aufbau der angewandten Regelungsstrategie vollständig gegen die Störung innerhalb eines Loops reagieren, da eine örtliche Störung Einfluss auf das gesamte Verhalten des Kraftwerks nimmt.

Statt die Information der örtlich vorherrschenden Strahlung direkt zu verwenden, bedarf es eines Verfahrens, dass die Information des zeitlich und räumlich aufgelösten DNI klassifiziert, damit die allgemein vorherrschende Wettersituation erkannt und dieser effizient entsprochen werden kann. Die zuvor formulierten Optimierungspunkte beschreiben Anforderungen an die Regelung unter Bedingungen von Clear-

sky sowie hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität. Die Information, wann diese Bedingungen vorherrschen, ist eine entscheidende, um die Regelparameter an das aktuell vorherrschende Szenario anzupassen. Dementsprechend ist die Aufgabe der Klassifizierungsverfahren, die Information der Strahlungskarte zu verwenden, um den zeitlich und räumlich aufgelösten abgebildeten DNI einer dieser Bedingungen in Form einer Klasse zuzuordnen.

3.1. Entwicklung von Verfahren zur Beschreibung der Variabilität

Coimbra et al. definieren in [27] einen Index V , der die Standardabweichung des Clearsky-Index k_c über die Zeit berechnet.

$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=0}^N (\Delta k_c t)^2} \quad (3.1)$$

Dabei beschreibt k_c das Verhältnis zwischen dem gemessenen DNI und dem bei einem wolkenfreien Himmel vorherrschenden Clearsky-DNI. Durch diese Berechnungsvorschrift kann k_c einen Wert zwischen Eins und Null annehmen. Entspricht der gemessene DNI dem Clearsky-DNI, so weist k_c einen Wert von Eins auf. Je mehr der gemessene DNI abweicht, desto kleiner wird k_c . Die Standardabweichung von k_c über eine gewisse Zeitspanne ist somit ein Indikator für die zeitliche Variabilität des DNI. In der Literatur gibt es mehrere Methoden, die über den Clearsky-Index die zeitliche Variabilität des DNI bewerten.

In [28] untersuchten Landelius et al. diese Methoden, um aus den gewonnenen Erfahrungen ein Klassifizierungsverfahren zur Berechnung der zeitlichen Variabilität zu entwickeln. Dieses Klassifizierungsverfahren wird in Abschnitt 3.1 vorgestellt und an die vorliegende Problematik angepasst. Weiterhin kann es für eine Beschreibung von zeitlicher Variabilität verwendet werden. Zur Beschreibung der räumlichen Variabilität wird in Abschnitt 3.1.2 ein Klassifizierungsverfahren entwickelt, das sich auf die Funktionsweise des Nowcasting-Systems stützt.

3.1.1. Zeitliche Variabilität

Das Klassifizierungsverfahren, das aus dem DNICast Report von Landelius et al. hervorgeht, nutzt zwei Kriterien, um den DNI zu klassifizieren. Das erste Kriterium basiert auf dem zuvor beschriebenen Clearsky-Index $k_c(t)$. Dieser wird über das Verhältnis von dem Clearsky-DNI $DNIClear(t)$ zu dem vorliegenden DNI $DNI(t)$ berechnet (Gleichung 3.2).

$$k_c(t) = \frac{DNI(t)}{DNIClear(t)} \quad (3.2)$$

Das zweite Kriterium bezieht sich auf die Anzahl an Richtungswechseln, die der DNI-Verlauf innerhalb der untersuchten Zeitspanne aufweist. Ein Richtungswechsel wird anhand eines lokalen Maxima oder Minima festgelegt. Dabei gilt ein Maxima

oder Minima jedoch erst als Richtungswechsel, wenn der k_c des Maxima oder Minima 13 % vom vorherigen abweicht. Dadurch werden geringe Schwankungen im DNI, die u. a. durch Signalrauschen entstehen, bei der Bewertung der zeitlichen Variabilität vernachlässigt. Das Klassifizierungsverfahren berechnet für beide Parameter die gleitenden Mittelwerte für eine Stunde und stuft diese anhand von festgelegten Grenzwerten in eine von acht Klassen ein. So kann der DNI-Verlauf für den gesamten Tag klassifiziert werden. Die gleitenden Mittelwerte sind notwendig, damit es bei wechselhaften Wolkenzügen zu keiner hohen Fluktuation zwischen den Klassen kommt [28].

Entsprechend des Reports in [28] und der Abbildung A.3 im Anhang gilt folgende Beschreibung der Klassen:

- **Klasse 1:** Beschreibt den Fall Clearsky. Es liegt keine zeitliche Variabilität vor und der DNI entspricht dem des Clearsky-DNI.
- **Klasse 2:** Beschreibt noch immer nahezu den Fall von Clearsky, jedoch weicht der DNI gering vom Clearsky-DNI ab.
- **Klasse 3:** Beschreibt eine erhöhte zeitliche Variabilität. Der DNI sinkt sprunghaft auf 30 bis 50 % des Clearsky-DNI.
- **Klasse 4:** Beschreibt eine hohe zeitliche Variabilität, bei der der DNI zeitweise einen Wert von bis zu $0 \frac{W}{m^2}$ erreicht.
- **Klasse 5:** Beschreibt eine geringe zeitliche Variabilität, jedoch sinkt der DNI hier für längere Zeiten auf einen niedrigen Wert.
- **Klasse 6:** Beschreibt eine hohe zeitliche Variabilität während eines zeitgleich geringen DNI.
- **Klasse 7:** Beschreibt eine erhöhte zeitliche Variabilität. Der durchschnittliche DNI ist sehr niedrig, weist jedoch noch immer ein sprunghaftes Verhalten auf.
- **Klasse 8:** Beschreibt einen konstant niedrigen DNI von nahezu $0 \frac{W}{m^2}$, sodass keine zeitliche Variabilität vorherrscht.

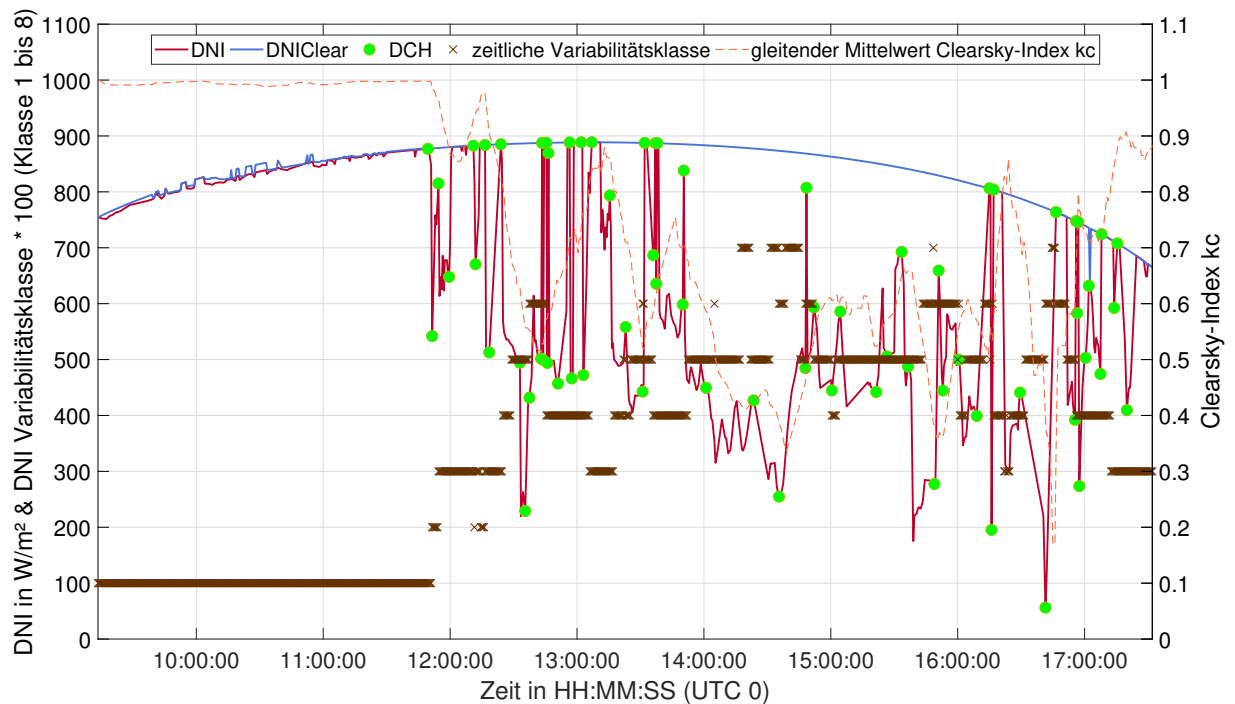
Die durch Meteorologen anhand einer Vielzahl von DNI-Verläufen manuell festgelegten Grenzwerte für die acht Klassen bildet die Tabelle A.1 im Anhang ab [28].

Durch die einstündigen gleitenden Mittelwerte unterliegt das Klassifizierungsverfahren einer enormen Trägheit, sodass ein schneller Klassenwechsel verhindert wird. Da dieser jedoch für die Stabilisierung durch die Regelung notwendig ist, werden in der verwendeten zeitlichen Klassifizierung die gleitenden Mittelwerte auf 15 Minuten reduziert. Als Konsequenz ist eine Anpassung der festgelegten Grenzwerte für das Kriterium der Richtungswechsel unerlässlich. Diese werden über ein lineares Verhältnis von den Originalgrenzwerten abgeleitet. Die verwendeten Grenzwerte für den Clearsky-Index entsprechen weiterhin den im Report festgelegten. Zudem basiert die Berechnung des DNI, anders als in [28], nicht auf einer punktuellen Messung über die Pyrheliometerstationen, sondern auf einem sich durch die Strahlungskarten ergebenden Durchschnitt. Tabelle 3.1 enthält die angepassten Grenzwerte aller acht Klassen.

Tabelle 3.1.: Grenzwerte des Klassifizierungsverfahrens für die zeitliche Variabilität

Klasse	Clearsky-Index k_c	Anz. an Richtungswechsel DCH
1	0.99	0-1
2	0.95	0-2
3	0.92	0-5
4	0.71	2-8
5	0.66	0-3
6	0.41	2-6
7	0.18	0-5
8	0	0-1

Abbildung 3.1 zeigt die Resultate des Klassifizierungsverfahrens anhand des durch die Strahlungskarten erzeugten DNI-Verlaufs für den 9. September 2015. Hier beschreibt die rote Linie den über die Strahlungskarte ermittelten durchschnittlichen DNI auf dem gesamten Solarfeld, die blaue Linie den Clearsky-DNI, der über das Nowcasting-System berechnet wurde, die grünen Markierungen die ermittelten Richtungswechsel, die braunen Kreuze die klassifizierte Klasse, die für den entsprechenden Zeitschritt ermittelt wurde und die orange gestrichelte Linie den Clearsky-Index für den jeweiligen Zeitschritt.

**Abbildung 3.1.:** Klassifizierung der zeitlichen Variabilität anhand des 9. September 2015.

Für die ersten drei Stunden des Tags beschreibt das Klassifizierungsverfahren den DNI-Verlauf mit Klasse Eins, also Clearsky. Ab 12:00 Uhr dominiert dann Klasse Drei, die eine hohe Variabilität bei einem zeitgleich hohen DNI beschreibt. Ein Nachteil der gleitenden Mittelwerte wird bei 12:15 Uhr deutlich. Der DNI entspricht für

eine gewisse Zeit wieder dem Clearsky-DNI, doch auch die 15-minütigen gleitenden Mittelwerte weisen noch immer eine zu hohe Trägheit auf, um einer Einstufung in Klasse Eins gerecht zu werden. In Bezug auf die Regelung ist dies unerwünscht, da an dieser Stelle für eine respektable Zeit andere Bedingungen herrschen, als von der Klassifizierung beschrieben.

Eine interessante Klasse stellt Klasse Vier dar. Diese überwiegt zu den Zeiten, an denen die zeitliche Variabilität sehr hoch ist und der Verlauf des DNI starke Flanken aufweist. Ein gutes Beispiel für diese Klasse beschreibt der Verlauf des DNI um 13:00 Uhr. Hier zeigt die Abbildung eine Vielzahl ermittelter Richtungswechsel in einem sehr kurzen Zeitfenster. In diesem Bereich weist der DNI die höchste Variabilität des gesamten Tags auf. Ab 14:00 Uhr nimmt die Variabilität deutlich ab und der DNI ist stabil auf einem niedrigen Niveau, so wie es die Grenzwerte von Klasse Fünf beschreiben.

Zwischen 14:30 Uhr und 15:00 Uhr klassifiziert das Verfahren den niedrigen DNI-Verlauf mit Klasse Sechs und Sieben. Der nachteilige Effekt der Trägheit zeigt sich nochmals zu den Zeiten, an denen ebenfalls Klasse Sieben klassifiziert wurde (circa 16:00 Uhr und 16:45 Uhr). Zwar sinkt der DNI zu diesen Zeiten auf einen wesentlich niedrigeren Wert als zuvor, jedoch verweilt der DNI nicht lange genug auf diesem Niveau, sodass die Mittelwerte die Grenzwerte, erst kurz bevor der DNI wieder ansteigt, überschreiten.

Trotz der Trägheit weist das Klassifizierungsverfahren insgesamt eine zuverlässige und nachvollziehbare zeitliche Klassifizierung auf und beschreibt durch den Clearsky-Index und die Richtungswechsel den Verlauf des DNI repräsentativ.

3.1.2. Räumliche Variabilität

Räumliche Variabilität kann, wie die zeitliche Variabilität, unterschiedlich intensiv ausfallen. Die entstehende Problematik ist jedoch unabhängig von der Intensität der räumlichen Variabilität stets eine ähnliche. Dies lässt sich anhand des folgenden Szenarios nachvollziehen: Wenn eine Hälfte des Solarfelds Beschattung erfährt, während die andere Hälfte vollständig bestrahlt wird, ist die räumliche Variabilität maximal. Die Vorsteuerung „FF Loop“ stellt nun in Abhängigkeit des durchschnittlichen DNI einen theoretisch benötigten Pumpdruck ein, sodass im Falle einer hohen räumlichen Variabilität des DNI die Looptemperaturen signifikant differieren. Die Folge ist Überhitzung der einen Hälfte und Unterkühlung der anderen Hälfte des Solarfelds. Das beschriebene Szenario weist eine gleich große beschattete und unbeschattete Fläche auf. Nimmt der Anteil der beschatteten Fläche zu und dementsprechend die unbeschattete Fläche ab, weist das Solarfeld eine geringere räumliche Variabilität auf als zuvor. In diesem Fall sinkt der auf das gesamte Solarfeld wirkende durchschnittliche DNI und der Pumpdruck passt sich über die Berechnungsvorschrift der Vorsteuerung „FF Loop“ erneut an diesen an. Da der Clearsky-DNI nur auf eine sehr kleine Fläche wirkt, weicht die Bestrahlung dieser Bereiche signifikant vom berechneten durchschnittlichen DNI ab. Die Folge ist eine Überhitzung der unbeschatteten Loops, während zeitgleich die beschatteten Loops der Solltemperatur folgen, da diese mit einem nahezu optimalen Massenstrom versorgt werden.

Das Verhältnis zwischen der beschatteten und unbeschatteten Fläche des Solarfelds ist somit eine entscheidende Größe, von der der weitere Verlauf der Looptemperaturen abgeleitet werden kann. Dieses Verhältnis ist im Folgenden als Schattenanteil S_A definiert und kann über Gleichung 3.3 berechnet werden.

$$S_A = \frac{A_{BF}}{A_{SF}} \cdot 100 \% \quad \text{mit} \quad 0 \% \leq S_A \leq 100 \% \quad (3.3)$$

Hier ist A_{BF} die beschattete Fläche des Solarfelds und A_{SF} die gesamte Fläche des Solarfelds. Der Schattenanteil stellt das erste Kriterium zur Bewertung der räumlichen Variabilität dar.

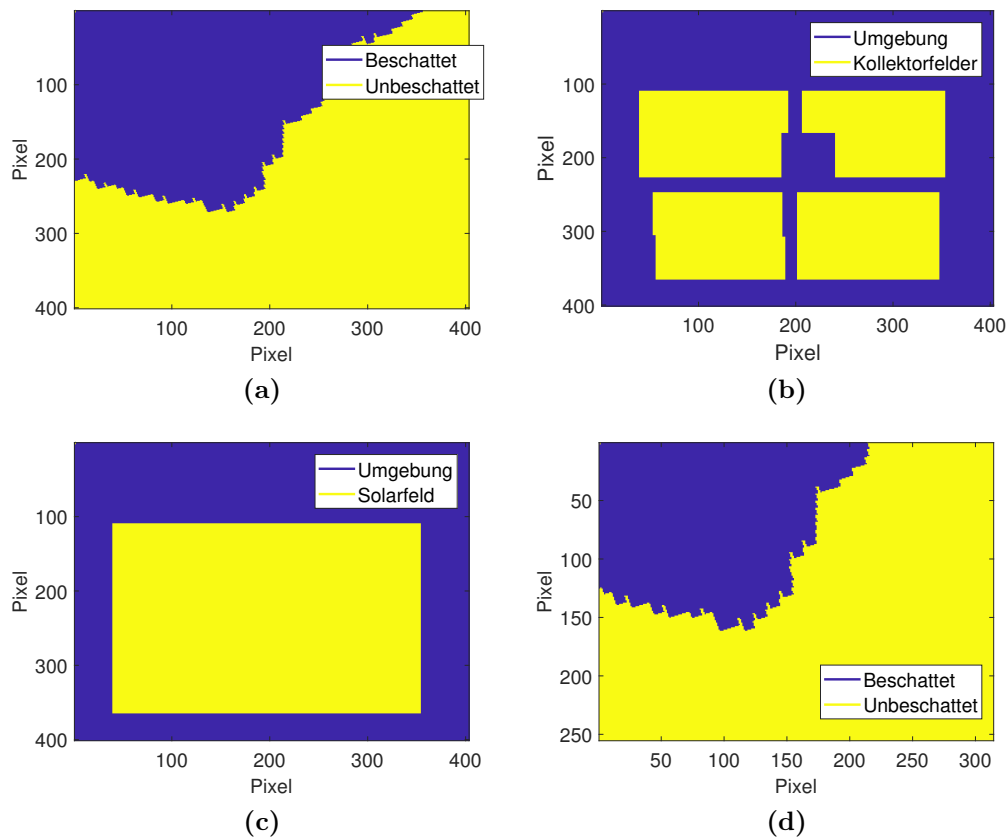


Abbildung 3.2.: Prozess der Schattenkarten-Erzeugung des Solarfelds. a) Aus der Strahlungskarte hervorgehende Schattenkarte. b) Erzeugung der Kollektorfelder-Maske über GPS-Koordinaten. c) Erzeugung der Solarfeld-Maske. d) Erzeugte Schattenkarte für den Bereich des Solarfelds.

Um die für den Schattenanteil benötigten Parameter zu bestimmen, durchläuft das Klassifizierungsverfahren vier Prozesse. Zu Beginn erzeugt das Verfahren eine Schattenkarte. Diese kann über die Eigenschaft des Nowcasting-Systems, das ein Pixel nur als Wolke definiert, wenn diese den DNI auf maximal 70 % des Clearsky-DNI reduziert, generiert werden. Dafür ist eine Untersuchung des DNI jedes Pixels der Strahlungskarte notwendig. Die so generierte Schattenkarte ist in Abbildung 3.2a dargestellt. Die auf dieser Karte abgebildeten Pixel werden durch GPS-Koordinaten beschrieben und binär als beschattet oder unbeschattet charakterisiert. Über das

Verhältnis zwischen beschatteter und unbeschatteter Pixel kann letztlich die Fläche des Schattens berechnet werden.

Im nächsten Schritt erzeugt das Verfahren zur Verkleinerung des Kartenausschnitts eine Maske, die auf die generierte Schattenkarte angewandt wird. Dieser Schritt ist notwendig, da die Schattenkarte eine größere Fläche als die des Solarfelds abbildet. Die Maske des Solarfelds wird zuerst über die Eckpunkte der Solarfelder abgeleitet. Dazu verwendet das Verfahren die hinterlegten GPS-Koordinaten der Eckpunkte. Diese werden in die zugehörigen Pixelkoordinaten der Schattenkarte umgerechnet, was eine Erzeugung der Kollektorfelderflächen ermöglicht (Abbildung 3.2b). Im dritten Schritt werden die vier erzeugten Flächen der Kollektorfelder zusammengefügt, sodass eine gesamte Fläche die Grenzen des Solarfelds repräsentiert (Abbildung 3.2c). Im letzten Schritt wird die Maske des Solarfelds auf die zuvor erzeugte Schattenkarte angewandt, sodass der betrachtete Bereich auf den des Solarfelds reduziert wird. Die generierte Schattenkarte des Solarfelds ist in Abbildung 3.2d dargestellt. Ein Vergleich der Achsen der vollständigen Schattenkarte und der des Solarfelds zeigt die Verkleinerung der Fläche. Über die erzeugte Schattenkarte des Solarfelds lassen sich nun A_{BF} und A_{SF} bestimmen und die Schattenanteil S_A berechnen.

Das zweite Kriterium basiert auf der Durchlässigkeit der Wolken, die den Schatten auf das Solarfeld werfen. Diese beschreibt die durch die Wolken herbeigeführte Reduktion des DNI. Der Parameter des Kriteriums wird im Folgenden als Schattenindex S_i definiert und kann über folgenden Zusammenhang berechnet werden:

$$S_i = \frac{DNI_{BF}(t)}{DNI_{Clear}(t)} \quad \text{mit} \quad 0 \leq S_i \leq 1 \quad (3.4)$$

Hier beschreibt $DNI_{BF}(t)$ den durchschnittlichen auf die beschattete Fläche wirkenden DNI sowie $DNI_{Clear}(t)$ den Clearsky-DNI. Weist der Schatten einen hohen S_i -Wert auf, wird dieser fortlaufend als heller Schatten bezeichnet. Ist der S_i -Wert niedrig, wird der Schatten als dunkel bezeichnet.

Tabelle 3.2.: Grenzwerte des Klassifizierungsverfahrens für die räumliche Variabilität

Klasse	Schattenanteil S_A	Schattenindex S_i
1	0 - 3	beliebig
2	3 - 100	0.9 - 1.0
3	3 - 60	0 - 0.9
4	60 - 100	0 - 0.9
5	100	0 - 0.35

Mit dem Schattenanteil und dem Schattenindex ist das Verfahren in der Lage, die räumliche Variabilität präzise zu beschreiben, da sowohl das Verhältnis zwischen beschatteter Fläche und unbeschatteter Fläche als auch das Verhältnis beider auf die Flächen wirkenden DNI-Werte bekannt ist. Um eine weitere Reduzierung der Trägheit zu erzielen, verwendet das räumliche Verfahren, anders als das zeitliche, lediglich fünfminütige gleitende Mittelwerte. Um die räumliche Variabilität anhand dieser Kriterien zu beschreiben, wurden insgesamt fünf Klassen eingeführt. Dabei

weisen die Klassen teilweise keine, eine geringe oder eine sehr hohe räumliche Variabilität auf. Tabelle 3.2 listet die festgelegten Grenzwerte auf, die zu folgenden Charakteristiken der Klassen führen:

- **Klasse 1 Clearsky (CS):** Beschreibt den Fall einer sehr geringen bis keiner räumlichen Variabilität. Das Feld wird homogen mit Clearsky-DNI bestrahlt.
- **Klasse 2 Helle Schatten (HS):** Beschreibt eine geringe räumliche Variabilität, da der DNI nur eine geringe Abweichung vom Clearsky-DNI aufweist. Das Feld wird durch eine Wolke mit hoher Durchlässigkeit beschattet. Die Größe des Schattens ist dabei irrelevant.
- **Klasse 3 Kleine Schatten (KS):** Beschreibt eine hohe räumliche Variabilität, bei der kleine bis mittelgroße Teile des Felds durch Wolken mit über einen großen Bereich variierender Durchlässigkeit beschattet werden und die so zu differierenden Loops führt.
- **Klasse 4 Große Schatten (GS):** Beschreibt eine mittlere bis geringe räumliche Variabilität, bei der große Teile des Felds durch Wolken mit über einen großen Bereich variierender Durchlässigkeit beschattet werden.
- **Klasse 5 Starker Overcast (SO):** Beschreibt den Fall eines vollständigen Overcasts. Das gesamte Solarfeld wird beschattet, sodass keine räumliche Variabilität vorhanden ist. Derweilen weist der DNI einen sehr geringen Wert auf.

Abbildung 3.3 zeigt die Klassifizierung des Verfahrens anhand des DNI-Verlaufs für den 9. September 2015 gegen die Zeit. Hier beschreibt die rote Linie den durchschnittlichen DNI auf dem gesamten Solarfeld, die blaue Linie den Clearsky-DNI, die braunen Kreuze die klassifizierte Klasse, die grüne Linie den gleitenden Mittelwert des Schattenanteils und die orange Linie den gleitenden Mittelwert des Schattenindex.

Wie auch zuvor bei dem zeitlichen Klassifizierungsverfahren, klassifiziert das räumliche Verfahren die ersten Stunden mit „Clearsky“. Eine beispielhafte Darstellung für die Klasse „Clearsky“ liefert für den Zeitpunkt 11:26:30 Uhr die Abbildung 3.4a, die das Kraftwerk unter homogener Bestrahlung zeigt. Im weiteren Verlauf dominiert jedoch nicht wie bei der zeitlichen Klassifizierung eine Klasse. Aufgrund der geringeren Trägheit stuft das Verfahren die Strahlungskarten um circa 12:05 Uhr wieder als „Clearsky“ ein.

Das Verfahren klassifiziert die Störung vor 12:00 Uhr als „Helle Schatten“ sowie „Kleine Schatten“. Eine visuelle Darstellung dieser Klassen vermitteln Abbildung 3.4b, die die Strahlungskarte für den Zeitpunkt 11:53:30 Uhr sowie Abbildung 3.4c, die die Strahlungskarte für den Zeitpunkt 11:51:30 Uhr darstellen. Erstere zeigt einen minimal abweichenden DNI, sodass über dem Solarfeld eine geringe räumliche Variabilität vorherrscht. Hingegen zeigt sich bei der Klasse „Kleine Schatten“ eine sehr hohe Variabilität, da hier ein größerer Teil des Solarfelds beschattet und zeitgleich der DNI der beschatteten Fläche sehr niedrig ist. Zusätzlich weist der Verlauf des DNI zu diesen Zeiten sehr starke Flanken auf, demnach sinkt der durchschnittliche auf das Solarfeld wirkende DNI abrupt ab, was sich auf den geringen DNI im Bereich der beschatteten Fläche zurückführen lässt.

Die dominanteste Klasse des Tags ist Klasse Vier, „Große Schatten“. Diese tritt zwischen 12:00 Uhr und 17:00 Uhr nahezu durchgängig auf. Insgesamt charakterisiert diese Klasse wenig schwankende DNI-Verläufe. Abbildung 3.4d zeigt eine visuelle Darstellung der Klasse für den Zeitpunkt 12:50:00 Uhr. Das Feld ist nahezu vollständig beschattet, sodass nur noch kleine Bereiche vollständig bestrahlt werden. Dadurch weist das Solarfeld eine sehr geringe räumliche Variabilität auf. Der Grund für die Häufigkeit dieser Klasse hängt mit den festgelegten Grenzwerten zusammen. Wenn es zu einer Beschattung des Solarfeldes kommt, liegt diese, wie es die Grafik zeigt, überwiegend im Bereich zwischen 60 bis 100 % von dessen Fläche.

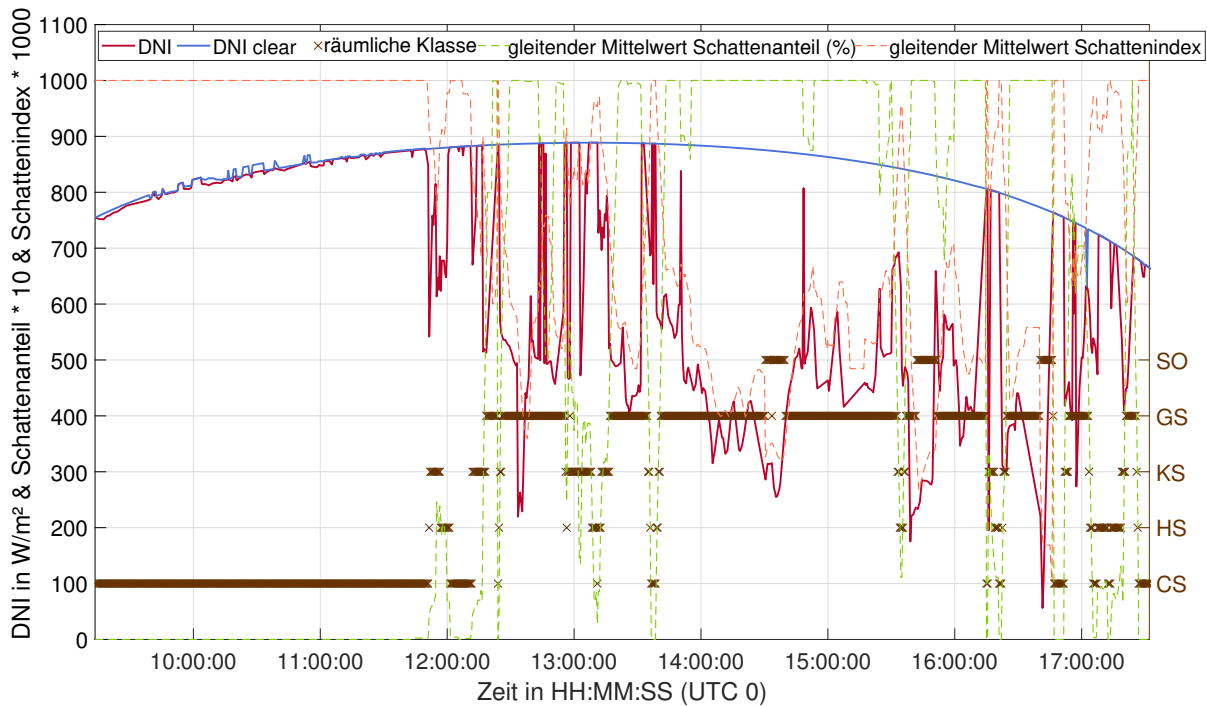


Abbildung 3.3.: Klassifizierung der räumlichen Variabilität anhand des 9. September 2015.

Die Klasse „Starker Overcast“ tritt während des Tagesverlaufs insgesamt drei Mal auf. Das erste Mal um den Zeitpunkt 14:30 Uhr, ein zweites Mal um 15:40 Uhr und ein letztes Mal um 16:30 Uhr. Dies sind zugleich die Zeiten, zu denen der DNI die geringsten Werte aufweist. Bei Betrachtung der Abbildung 3.4e, die die Strahlungskarte zum Zeitpunkt 16:42:30 Uhr darstellt, zeigt sich ein vollständig beschattetes Solarfeld, das zugleich einen sehr geringen DNI aufweist. Diese Klasse repräsentiert dementsprechend das Gegenteil von „Clearsky“. In beiden Fällen wird das Feld homogen bestrahlt, lediglich die Intensität der Strahlung ist abweichend.

Die eingeführten Kriterien des entwickelten Klassifizierungsverfahrens stufen die Strahlungskarten zuverlässig in fünf unterschiedliche Klassen ein. Mit dem Schattenanteil und dem Schattenindex werden leicht interpretierbare Parameter verwendet, die anhand von für die Regelung relevanten Grenzwerten die Klassen beschreiben. Zusätzlich konnte durch Verwendung kürzerer Zeitintervalle die Trägheit verringert werden, wodurch jedoch höhere Fluktuationen entstehen.

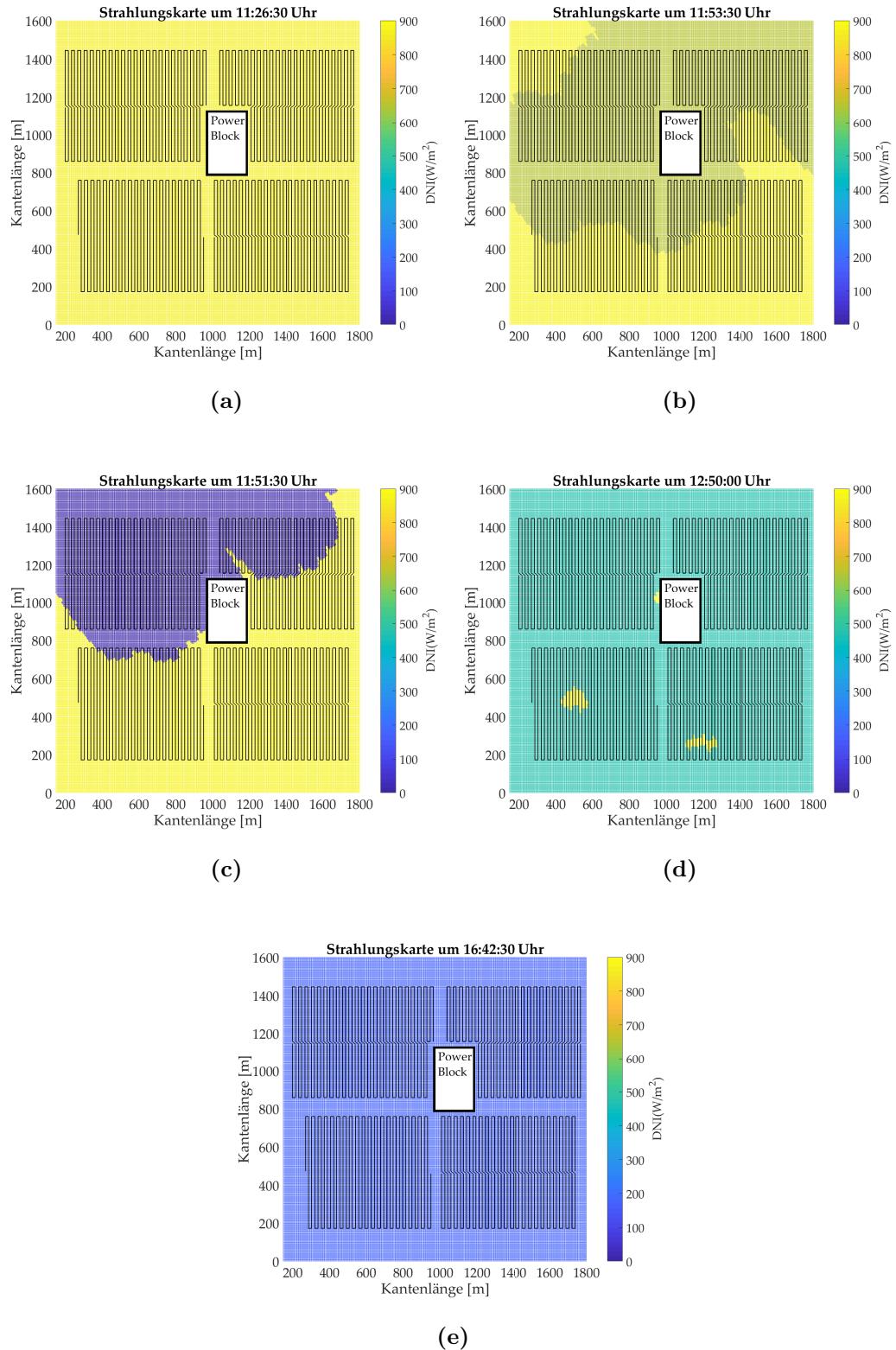


Abbildung 3.4.: Darstellung der fünf Klassen, die die räumliche Variabilität des DNI beschreiben. Hier zeigen die Abbildungen über beide Kantenlängen die Positionen der vier Kollektorfelder sowie die des Powerblocks. a) Klasse 1: Clearsky. b) Klasse 2: Helle Schatten. c) Klasse 3: Kleine Schatten. d) Klasse 4: Große Schatten. e) Klasse 5: Starker Overcast.

3.2. Vergleich der Klassifizierungsverfahren

Eine Auswertung der 30 verfügbaren Tage durch beide Klassifizierungsverfahren ergab die in Abbildung 3.5 dargestellte Häufigkeit der Klassen. Dabei basiert die Statistik auf einer Klassifizierung von insgesamt 38.580 Strahlungskarten, sodass eine repräsentative Verteilung zwischen den Klassen entsteht. Das linke Balkendiagramm stellt die Verteilung der Klassen des räumlichen und das rechte Balkendiagramm die Verteilung der Klassen des zeitlichen Verfahrens dar.

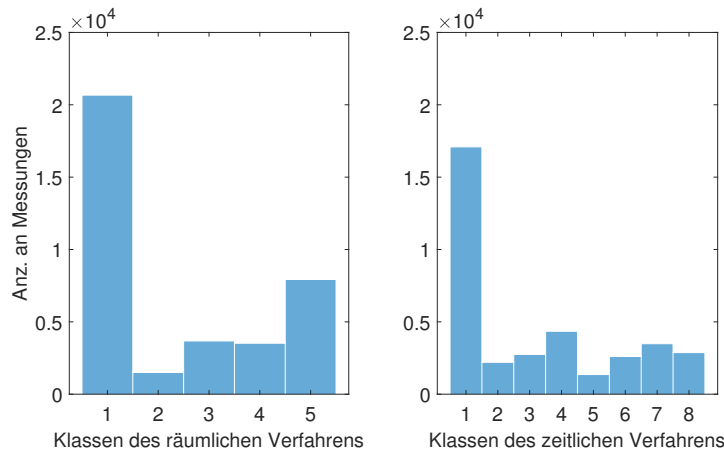


Abbildung 3.5.: Vergleich der Klassenhäufigkeit des räumlichen und zeitlichen Verfahrens auf Basis von 38.580 Strahlungskarten.

Das räumliche Verfahren weist eine signifikante Häufigkeit von Klasse Eins „Clearsky“, auf. Da an dem Standort Almería, Spanien, überwiegend Clearsky-Bedingungen herrschen, ist dieses Ergebnis naheliegend und zudem sinnvoll für den effizienten Betrieb eines Parabolrinnenkraftwerks. Die am zweithäufigsten vorkommende Klasse ist „Starker Overcast“. Folglich ist das Solarfeld meist vollständig beschattet oder bestrahlt. In beiden Fällen erfährt es eine geringe räumliche Variabilität. Diese Erkenntnis ist positiv in Bezug auf die Regelung, da bei einem homogen bestrahlten Feld die Looptemperaturen nicht differieren. Weiterhin ist auffallend, dass die Klasse „Große Schatten“ zusammen mit der Klasse „Kleine Schatten“, trotz der festgelegten weiträumigen Grenzwerte, eine verhältnismäßig geringe Häufigkeit aufweisen. Die geringste Häufigkeit des räumlichen Verfahrens zeigt, wie auch am untersuchten Tag, die Klasse „Helle Schatten“.

Auch beim zeitlichen Verfahren dominiert die erste Klasse. Gemäß der Beschreibung in [28] stellt diese zusammen mit Klasse Zwei den Zustand des Clearsky dar. Anders als bei der räumlichen Klassifizierung sind die Klassen mit hoher zeitlicher Variabilität, wie Klasse Drei, Vier und Sechs, verhältnismäßig sehr häufig vertreten. Aber auch Klassen mit einer niedrigen zeitlichen Variabilität sowie einem geringen Clearsky-Index, also die Klassen Sieben und Acht wurden über den Datensatz mit einer bedeutenden Häufigkeit klassifiziert. Hingegen kam es selten zu einer Klassifizierung der Klasse Fünf.

Insgesamt zeigt sich, dass es über die 30 Versuchstage häufiger zu einer hohen zeitlichen Variabilität kommt als zu einer hohen räumlichen Variabilität. So ist

die Summe der Klassen Drei und Vier des räumlichen Verfahrens kleiner als die der Klassen Vier und Sechs des zeitlichen Verfahrens. Zu berücksichtigen ist dabei jedoch der Unterschied in den Zeitintervallen. Die längeren Zeitintervalle bei der zeitlichen Klassifizierung führen zu einer größeren Häufigkeit der Klassen, die mittlere Grenzwerte aufweisen. Ein Erreichen von extremen Grenzwerten, wie die der Klassen Sieben oder Acht, ist erst möglich, wenn diese Klasse über einen längeren Zeitraum vorherrscht, sodass die gleitenden Mittelwerte die entsprechenden Kriterien erfüllen. Die räumliche Klassifizierung wechselt die Klassen wesentlich schneller, sodass diese häufiger die extremen Grenzwerte der ersten und letzten Klasse erreicht.

Die vorgestellten Klassifizierungsverfahren beschreiben mit der zeitlichen und räumlichen Variabilität jeweils eine unterschiedliche Variabilität des DNI, wodurch zwei völlig unabhängige Betrachtungsweisen der Strahlungskarten entstehen. So beschränkt sich bei der zeitlichen Klassifizierung die Verwendung der Strahlungskarten auf die Berechnung des durchschnittlichen DNI, um diesen anschließend anhand des resultierenden Verlaufs zu klassifizieren. Hingegen liegt der Fokus bei der räumlichen Klassifizierung nicht auf dem Verlauf des DNI, sondern vielmehr auf einer ausführlichen Untersuchung des orts aufgelösten DNI jeder einzelnen Strahlungskarte. Trotz der unterschiedlichen Ansätze ergeben sich Übereinstimmungen in den entwickelten Klassen.

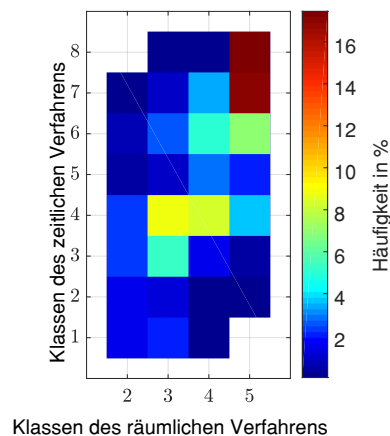


Abbildung 3.6.: Häufigkeit einer Koinzidenz der Klassen des räumlichen und zeitlichen Verfahrens.

Abbildung 3.6 zeigt in Form eines Streudiagramms, wie häufig die Klassen beider Klassifizierungsverfahren koinzidieren. Auch hier basiert das Ergebnis auf einer Auswertung der 30 Versuchstage. Das dargestellte Streudiagramm zeigt über die Ordinate die Klassen des zeitlichen sowie über die Abszisse die Klassen des räumlichen Verfahrens. Der rechts abgebildete Farbbalken beschreibt die entsprechende Häufigkeit der koinzidierenden Klassen. Es ist anzumerken, dass die Klasse Eins des räumlichen Klassifizierungsverfahrens, also „Clearsky“, in der Abbildung nicht enthalten ist, da diese zusammen mit Klasse Eins des zeitlichen Verfahrens eine zu dominante Häufigkeit aufweist. Über 50 % der klassifizierten Strahlungskarten weisen eine Übereinstimmung beider Klassen auf. Diese Häufigkeit würde eine schlechte

Interpretation über den Farbverlauf zulassen, da die Übereinstimmungen in den anderen Fällen bei unter 15 % liegt.

Es ist auffallend, dass die Klassen Drei, Vier und Fünf des räumlichen Verfahrens eine starke Streuung über die zeitlichen Klassen aufweisen sowie die Klassen Vier und Sechs der zeitlichen über die räumlichen Klassen. Dennoch bestehen zwischen einigen Klassen beider Verfahren deutliche Koinzidenzen. Die Klasse Drei, „Kleine Schatten“, stimmt überwiegend mit den zeitlichen Klassen Drei und Vier überein. Diese beiden Klassen charakterisieren eine geringe bzw. die höchste zeitliche Variabilität. Die Klasse Vier, „Große Schatten“, koinzidiert überwiegend mit Klasse Vier und Sechs des zeitlichen Verfahrens. Diese charakterisieren sowohl einen mittleren als auch niedrigen Clearsky-Index mit einer ebenfalls hohen zeitlichen Variabilität. Des Weiteren tritt die Klasse „Große Schatten“ jedoch auch mit Klasse Sieben, die eine sehr geringe zeitliche Variabilität aufweist, verstärkt auf. Wiederum koinzidiert Klasse Fünf „Starker Overcast“, hauptsächlich mit den Klassen Sieben und Acht, die beide einen geringen Clearsky-Index sowie geringe bis keine zeitliche Variabilität vorweisen.

Allgemein lässt sich festhalten, dass Strahlungskarten, die eine erhöhte räumliche Variabilität aufweisen, auch zu einer höheren zeitlichen Variabilität neigen. Hingegen koinzidieren die Klassen mit niedriger räumlicher Variabilität tendenziell mit einer geringen zeitlichen Variabilität. Es zeigt sich insgesamt eine Tendenz zur Koinzidenz. Diese ist jedoch nicht groß genug, um die Klassen der zeitlichen und räumlichen Verfahren zusammenzufügen, ohne dass Informationen verloren gehen.

3.3. Verwendete Klassen der Klassifizierungsverfahren

Die vorgestellten Klassifizierungsverfahren beschreiben den zeitlich und räumlich aufgelösten DNI durch insgesamt 13 Klassen. Die Intention der Klassifizierung ist es, die allgemein vorherrschende Wettersituation zu erkennen, sodass die Regelung anhand dieser Information eine ausgelegte Strategie ausführt. Aufgrund der in Abbildung 3.6 aufgezeigten Tatsache, dass zu jedem Zeitschritt eine von 31 möglichen Kombinationen aus räumlicher und zeitlicher Klasse auftreten kann, entsteht ein komplexes Netz an Informationen. Dies ist nicht im Sinne der Zielsetzung der Klassifizierung, da eine hohe Anzahl an Möglichkeiten den Optimierungsprozess verkompliziert und eine Untersuchung der Hauptproblematik erschwert. Die Konsequenz ist eine notwendige Reduktion der Klassen auf die für die Regelung wesentlichen.

Allgemein liefern beide Klassifizierungsverfahren Klassen, die eine homogene Bestrahlung des Feldes, also Clearsky und Overcast, beschreiben. Prinzipiell wäre also eine Erkennung dieser Wetterbedingungen durch beide Verfahren möglich, jedoch erreicht das räumliche Verfahren eine höhere Zuverlässigkeit, da dieses durch die fünfminütigen gleitenden Mittelwerte auch eine Erkennung von wechselhaften Bedingungen in einem kurzen Zeitraum erreicht. Eine Anpassung der gleitenden Mittelwerte wäre zwar auch für das zeitliche Verfahren möglich, allerdings ist eine zusätzliche lineare Anpassung auf fünfminütige gleitende Mittelwerte aufgrund des Kriteriums der Richtungswechsel nur bedingt umsetzbar und würde zu einem Verlust der Klas-

senidentität führen. Deshalb finden im Laufe dieser Arbeit die räumlichen Klassen „Clearsky“ und „Starker Overcast“ für diese Bedingungen Verwendung.

Die Klassen, die eine erhöhte räumliche Variabilität beschreiben, sind die Klassen „Helle Schatten“, „Kleine Schatten“ und „Große Schatten“. Die visuellen Darstellungen der drei Klassen in Abbildung 3.4 zeigen die Unterschiede in der vorherrschenden orts aufgelösten Strahlung auf. Insgesamt heben sich die drei Klassen anhand ihrer Grenzwerte signifikant voneinander ab, sodass eine Berücksichtigung aller drei Klassen sinnvoll ist.

Bei der Untersuchung koinzidierender Klassen zeigte sich, dass für das zeitliche Verfahren zwei Klassen, nämlich die Klassen Vier und Sechs, eine erhöhte Streuung über die Klassen „Kleine Schatten“, „Große Schatten“ und „Starker Overcast“ aufweisen. Besonders an beiden zeitlichen Klassen ist, dass diese die höchste zeitliche Variabilität des DNI beschreiben, sodass eine Berücksichtigung dieser beiden Klassen für die zeitliche Variabilität notwendig, aber auch ausreichend ist. Zudem unterscheiden sich die Klassen hauptsächlich durch den Clearsky-Index, der im Falle der Klasse Vier noch einen hohen Wert annimmt, hingegen bei Klasse Sechs sehr gering ist. Folglich beschreiben beide Klassen eine hohe zeitliche Variabilität für ein entweder stark bestrahltes Feld oder ein gering bestrahltes Feld. Durch Verwendung beider Klassen bleibt die grundsätzliche Information der zeitlichen Variabilität erhalten, sodass im Folgenden eine Strahlungskarte, die mit einer dieser Klassen klassifiziert wird, eine hohe zeitliche Variabilität des DNI beschreibt. Wird die Strahlungskarte nicht mit einer dieser zeitlichen Klassen klassifiziert, so ist die zeitliche Variabilität gering. Zudem findet die Information der beiden Klassen lediglich Berücksichtigung, wenn die klassifizierte Strahlungskarte ebenfalls als „Kleine Schatten“ oder „Große Schatten“ eingestuft wird. So entstehen im Falle der Klasse „Kleine Schatten“ zwei und im Falle der Klasse „Große Schatten“ drei Unterklassen, so wie es Tabelle 3.3 beschreibt.

Letztlich finden innerhalb der klassenspezifischen Regelung alle räumlichen sowie zwei zeitliche Klassen Verwendung. Es entstehen fünf Hauptklassen, die grundsätzlich den räumlichen Klassen entsprechen, weshalb diese im weiteren Verlauf auch die Namen der räumlichen Klassen übernehmen.

Tabelle 3.3.: Verwendete Klassen der Klassifizierungsverfahren.

Klasse	Räumliche Klasse	Zeitliche Klasse
1	Clearsky	irrelevant
2	Helle Schatten	irrelevant
3.1	Kleine Schatten	$\neq 4$
3.2	Kleine Schatten	4
4.1	Große Schatten	$\neq 4, 6$
4.2	Große Schatten	4
4.3	Große Schatten	6
5	Starker Overcast	irrelevant

Optimierung der Regelung eines Parabolrinnenkraftwerks

4.1. Untersuchung des Systemverhaltens

Für die Optimierung der Regelung ist ein Verständnis für die Dynamik des Kraftwerks notwendig, um aus erkannten Problemen der Referenzregelung sinnvolle Lösungsansätze abzuleiten. Grundsätzlich wird die Dynamik auf Grund des DNI ausgelöst und durch die beiden Stellgrößen, also dem Pumpdruck sowie der Fokussierungsrate, beeinflusst und im Sinne der Regelung kontrolliert. Die mathematischen Zusammenhänge, die diese Beeinflussung beschreiben, liefern die in Abschnitt 2.1.1 vorgestellten Differentialgleichungen:

$$\begin{aligned} \rho_f \bar{c}_{v_f} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + v_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) &= \frac{\dot{q}_{conv}}{A_{conv}} \\ \rho_w A_{CS} c_{pW} \frac{\partial T_w}{\partial t} &= \dot{q}_{sol} - \dot{q}_{loss} - \dot{q}_{conv} \end{aligned}$$

Eine leichtere Interpretation der beiden Differentialgleichungen entsteht durch Umformung:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\dot{q}_{conv}}{A_{conv} \rho_f \bar{c}_{v_f}} - v_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\dot{q}_{sol}}{\rho_w A_{CS} c_{pW}} - \frac{\dot{q}_{loss}}{\rho_w A_{CS} c_{pW}} - \frac{\dot{q}_{conv}}{\rho_w A_{CS} c_{pW}} \quad (4.2)$$

Die Differentialgleichungen beschreiben den Prozess der Erwärmung des Absorberrohrs sowie des Fluids durch die Umwandlung von Strahlungsenergie in thermische Energie. Zu Beginn erwärmt sich das Absorberrohr über den spezifischen Wärme-

strom \dot{q}_{sol} , sodass die steigende Temperatur des Absorberrohrs letztlich über den konvektiven spezifischen Wärmestrom \dot{q}_{conv} ebenfalls zu einer ansteigenden Fluidtemperatur führt und der Anteil an thermischer Energie im System steigt. Der Einfluss des DNI sowie der Stellgrößen auf die Fluidtemperatur wird durch weitere Umformungsschritte deutlicher. Dazu wird Gleichung 2.5 in Gleichung 4.1 eingesetzt, sodass Gleichung 4.3 resultiert. Ebenso wird in Gleichung 4.2 die Gleichung 2.3 sowie wiederum Gleichung 2.5 eingesetzt. Dies führt zu Gleichung 4.4.

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\alpha_f \pi D_i (T_w - T_f)}{A_{conv} \rho_f \bar{c}_{v_f}} - v_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\eta_{opt} IAM \cos(\varphi) \eta_{endloss} w}{\rho_w A_{CSC_{pw}}} \cdot DNI \cdot r - \frac{\dot{q}_{loss}}{\rho_w A_{CSC_{pw}}} - \frac{\alpha_f \pi D_i (T_w - T_f)}{\rho_w A_{CSC_{pw}}} \quad (4.4)$$

Der Einfluss des Pumpdrucks auf die Fluidtemperatur ist durch die Fließgeschwindigkeit des Fluids v_f verdeutlicht. Der Pumpdruck bestimmt demnach die räumliche Temperatursteigerung während das Fluid durch das Absorberrohr fließt. Wird ein niedriger Pumpdruck eingestellt, fließt die Wärmeträgerflüssigkeit langsamer und nimmt über die Länge des Absorberrohrs mehr Wärme auf. Hingegen nimmt das Fluid weniger Wärme auf, wenn der Pumpdruck bzw. die Fließgeschwindigkeit zunimmt. Dieselbe Auswirkung wurde bereits zuvor über den Massenstrom durch Gleichung 1.1 in Kapitel 1 aufgezeigt. Die Fokussierungsrate r sowie der DNI beeinflussen die Veränderung der Temperatur des Absorberrohrs über die Zeit und bestimmen über diese auch direkt die zeitliche Temperaturänderung des Fluids. Hervorzuheben ist dabei, dass die Fokussierungsrate die Menge an konzentriertem DNI steuert. Ist die Fokussierungsrate gering, so sinkt auch der Anteil an konzentrierter Strahlung auf das Absorberrohr. Hingegen steigt dieser bei einer hohen Fokussierungsrate.

Beide Differentialgleichungen erster Ordnung repräsentieren PT-1 Glieder, die entsprechend des Prozessablaufs in Reihe geschaltet sind. Folglich ergibt sich ein PT-2 Verhalten für die Austrittstemperatur der Loops und des gesamten Solarfelds. Abbildung 4.1 verdeutlicht dies durch den Verlauf der blauen Kurve. Diese stellt das Verhalten der Austrittstemperatur aus dem Solarfeld während eines konstanten DNI von $400 \frac{W}{m^2}$ über die Zeit dar. Der Verlauf der Kurve charakterisiert durch die vorliegende Wendestelle und die minimale Überschwungung der Solltemperatur das Verhalten eines PT-2 Glieds. Ein besondere Eigenschaft des PT-2 System ist die Dämpfung, denn diese beeinflusst die Dynamik des Systems. In Abhängigkeit der Dämpfung, kann das PT-2 System stabil, grenzstabil oder sogar instabil sein. Im Falle der blauen Kurve wurde die Austrittstemperatur durch den adaptiven Pumpregler mit einem moderaten proportionalen Verstärkungsfaktor geregelt. Der Verlauf der Kurve weist nach Erreichen der Solltemperatur von $393 \text{ }^\circ\text{C}$ lediglich eine geringe Überschwungung auf. Danach stellt sich die erwünschte Temperatur ein und die Temperatur unterliegt keinerlei Schwingungen. Dementsprechend ist die Dämpfung ausreichend und das System kann als stabil bezeichnet werden. Der Verlauf der roten Kurve beschreibt die Regelung der Austrittstemperatur durch den adaptiven Pumpregler mit einem sehr aggressiven Verhalten. Hier weist die Austrittstemperatur des Solarfelds sehr starke Schwingungen auf. Die Dämpfung des Systems ist zu gering, sodass selbst nach neun Stunden die Austrittstemperatur noch immer

Schwingungen unterliegt. Da diese mit der Zeit jedoch stetig geringer werden, ist davon auszugehen, dass das System sich nach einer längeren Zeit stabilisiert. Dennoch wird über diesen Versuch deutlich, dass das Verhalten der Pumpregelung den Verlauf der Austrittstemperatur beeinflusst und imstande ist, das System zu destabilisieren. Die Auswahl des Reglerverhaltens kann demnach sowohl eine positive als auch eine negative Wirkung auf die Dynamik aufweisen.

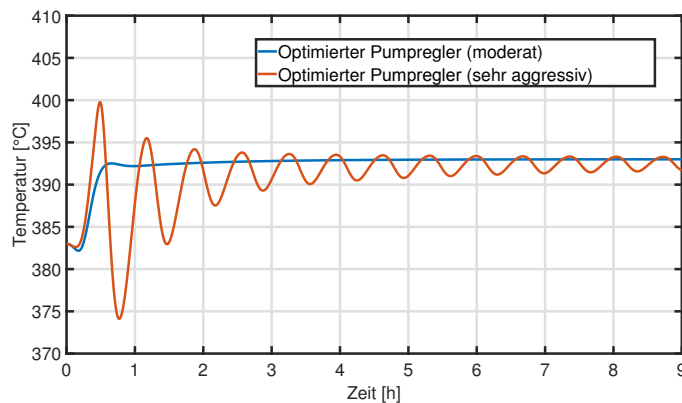


Abbildung 4.1.: Regelung des Parabolrinnenkraftwerks bei einem experimentell konstant gesetzten DNI von $400 \frac{W}{m^2}$ durch den adaptiven Pumpregler mit einem moderat bzw. sehr aggressiv eingestellten Verhalten.

Eine weitere Eigenschaft des Parabolrinnenkraftwerks ist die Totzeit des Systems, die zu einer Problematik der Regelbarkeit führt. Zur Untersuchung der Totzeit wurde, während einer konstanten Fokussierungsrate sowie eines konstanten Pumpdrucks, dem Eingang des Systems eine Sprungfunktion in Form einer DNI-Steigerung von 400 auf $600 \frac{W}{m^2}$ zugeführt. Das Parabolrinnenkraftwerk reagiert auf den Sprung mit einer entsprechenden Übergangsfunktion. Sowohl die Sprungfunktion als auch die Übergangsfunktion ist in [Abbildung 4.2](#) dargestellt.

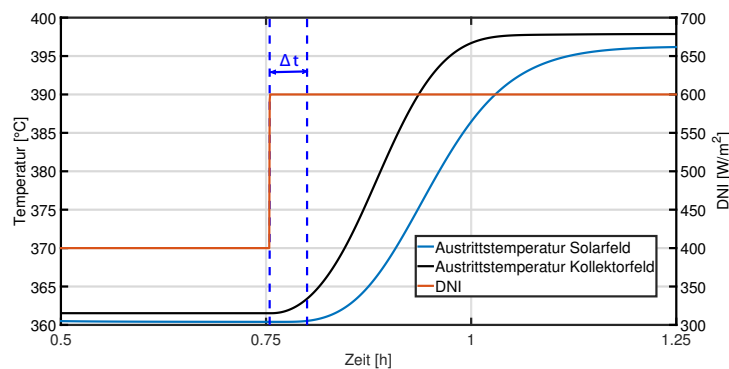


Abbildung 4.2.: Untersuchung der Totzeit des Systems durch eine Sprungfunktion des DNI.

Hier beschreibt die blaue Kurve die Übergangsfunktion der Austrittstemperatur des Solarfelds, die schwarze Kurve die Übergangsfunktion der Austrittstemperatur eines Kollektorfelds und die rote Kurve die Sprungfunktion des DNI, die auf den Eingang

des Systems wirkt. Zum Zeitpunkt des Sprungs des DNI reagiert die Austrittstemperatur des Kollektorfelds direkt auf die Veränderung und unterliegt somit keiner Totzeit. Hingegen reagiert die Austrittstemperatur des Solarfelds erst mit einer gewissen Verzögerung auf den Sprung. Diese ist in der Abbildung als Δt dargestellt und beschreibt die Totzeit der Austrittstemperatur des Solarfelds. Die Totzeit des Systems entsteht durch den Aufbau des Kraftwerks, denn dieser basiert auf einem weitläufigen hydraulischen Netzwerk an Loops. Strömt das Fluid aus dem Hauptrohr in die vier Kollektorfelder, teilt es sich anschließend in die parallel geschalteten Loops auf. Erfährt das System nun einen Sprung im DNI, steigt die Fluidtemperatur am Austritt der Loops an. Unmittelbar nach Verlassen der Loops bildet sich die jeweilige Austrittstemperatur der Kollektorfelder, die aus diesem Grund auch keine Totzeit aufweist. Ab diesem Zeitpunkt benötigt das Fluid jedoch einige Zeit, um über die Rohrleitungen zurück zum Hauptrohr zu strömen, in dem sich letztlich die Austrittstemperatur des Solarfelds einstellt. Diese benötigte Zeit bildet in der Abbildung die Totzeit ab.

Ein identischer Effekt tritt auf, wenn man nicht eine Sprungfunktion des DNI, sondern des Pumpdrucks auf den Systemeingang aufgibt. Jedoch äußert sich hier sowohl eine Totzeit in der Austrittstemperatur des Solarfelds als auch in der des Kollektorfelds. Wird der anliegende Druck an der Pumpe sprunghaft erhöht, strömt das Fluid schneller durch das Solarfeld als zuvor. Dennoch benötigt die Wärmeträgerflüssigkeit nach der Erhöhung des Pumpdrucks eine gewisse Zeit, bis sie in die Loops fließt und sich durch ein schnelleres Durchströmen des Absorberrohrs eine geringere Austrittstemperatur des Kollektorfelds einstellt. Dementsprechend stellt sich eine Änderung der Austrittstemperatur erst ein, wenn das Fluid den Austritt des Kollektorfelds erreicht hat. Anschließend fließt das Fluid mit der veränderten Temperatur zurück in das Hauptrohr, wo sich die Austrittstemperatur des Solarfelds einstellt. Folglich ist die Totzeit des Systems ausschließlich abhängig von der Länge der Strecke zwischen dem Ort der Veränderung der jeweiligen Eingangsgröße und dem Ort der Messung, also dem des Austritts des Kollektorfelds bzw. Solarfelds.

Aufgrund der Tatsache, dass durch die Totzeit die Auswirkung einer Veränderung des DNI erst nach gewisser Zeit in der Austrittstemperatur des Solarfelds erkennbar ist, bildet sich auch die Regelabweichung mit Verzögerung. Folglich stellt der adaptive Pumpregler anhand der vorliegenden Regelabweichung eine Stellgröße, die im Optimalfall schon vor Δt Minuten hätte wirken müssen. Zusätzlich zu der verzögerten Anpassung der Stellgröße, beeinflusst diese die Austrittstemperatur des Solarfelds ebenfalls mit einer signifikanten Verzögerung. Um der Problematik, die durch die Totzeit entsteht, entgegenzuwirken, verwendet der Pumpregler die Vorsteuerung „FF Loop“, denn diese kann einen Wechsel des DNI vorzeitig erkennen und einen theoretisch benötigten Pumpdruck einstellen, bevor dieser vom adaptiven Regler auf Grund der Regelabweichung eingestellt wird. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, wird der über die Pyrheliometer ständig gemessene DNI zur Berechnung des theoretisch benötigten Pumpdrucks verwendet. Somit kann ein Sprung im DNI sofort erkannt und der entsprechende Pumpdruck eingestellt werden. Das bedeutet, dass die verzögerte Reaktion der Austrittstemperatur auf einen wechselnden DNI für die Regelung im Falle der Vorsteuerung irrelevant ist, da diese den Pumpdruck nicht

über die Regelabweichung bestimmt. Weicht der theoretisch benötigte Pumpdruck jedoch von der Realität ab, so bildet sich eine Regelabweichung, die der adaptive Regler kompensieren muss. Eine Folge der Führungsgröße ist somit bei einem zeitlich und räumlich variablen DNI dann nur noch bedingt möglich.

Die letzte für die Regleroptimierung interessante Eigenschaft ist der Mindestwert, den der DNI annehmen muss, damit die Solltemperatur bei vollständiger Fokussierung und dem niedrigst einstellbaren Pumpdruck überhaupt erreicht werden kann. Eine Simulation unterschiedlicher DNI-Werte unter diesen Bedingungen führte zu dem Ergebnis, dass der durchschnittlich auf das Solarfeld wirkende DNI circa $110 \frac{W}{m^2}$ aufweisen muss, damit dieser die Wärmeträgerflüssigkeit auf $393^\circ C$ erhitzt. Abbildung 4.3 zeigt die Verläufe der Austrittstemperatur des Solarfelds für eine homogene Bestrahlung von 120, 110, 100 und $90 \frac{W}{m^2}$. Es ist auffallend, dass ein geringer Unterschied von $10 \frac{W}{m^2}$ im DNI einen enormen Einfluss auf die Austrittstemperatur nimmt. Die Untersuchung zeigt, dass die Regelung aufgrund der Druckgrenzen der Pumpe¹ eine Mindestbestrahlung von circa $110 \frac{W}{m^2}$ benötigt. Ist diese geringer, kann die Regelung die Regelabweichung nicht ausregeln, sodass die Temperatur auf einen dem DNI entsprechenden Wert sinkt.

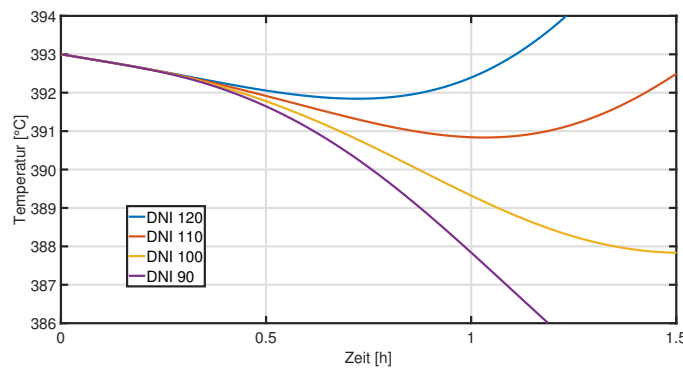


Abbildung 4.3.: Ermittlung des notwendigen DNI für eine Sollwertfolge der Austrittstemperatur des Fluids aus dem Solarfeld.

4.2. Adaptiver Pumpregler

Die Optimierung der Regelung unter Verwendung der Strahlungskarten beschränkt sich nicht nur auf eine Verbesserung des Reglerverhaltens innerhalb der eingeführten Klassen. Denn die Information der Strahlungskarte führt ebenfalls, durch eine präzisere Bestimmung des durchschnittlichen DNI, der auf das Solarfeld wirkt, zu einer automatischen Verbesserung des adaptiven Pumpreglers sowie der Vorsteuerung „FF Loop“. Statt wie in kommerziellen Parabolrinnenkraftwerken üblich, beruht die Ermittlung des durchschnittlich wirkenden DNI so nicht mehr auf den Pyrheliometerstationen, die auf dem Solarfeld verteilt sind, sondern auf dem durchschnittlichen DNI, den die Strahlungskarte beschreibt. In diesem Zusammenhang steigt der Nutzen der Strahlungskarte in Abhängigkeit von zwei Faktoren.

¹Mindestpumpdruck: 0,01 bar; Maximalpumpdruck: 15 bar.

Der primäre Faktor ist die am Parabolrinnenkraftwerk befindliche Anzahl an Pyrheliometern, denn je nach Anzahl an Messstationen variiert die Präzision der Messung. Diese weicht insbesondere von der Realität ab, wenn die räumliche Variabilität des DNI auf dem Solarfeld zunimmt. Im Falle des La Africana Kraftwerks in Córdoba und somit auch der verwendeten Referenzregelung sind dies lediglich zwei Pyrheliometer, sodass bei der vorliegenden Untersuchung der Nutzen der Strahlungskarte zur Berechnung des durchschnittlichen DNI deutlich höher ausfällt, als es bei anderen Kraftwerken der Fall wäre. Im Vergleich hierzu wurden bei der beschriebenen Validierung anhand des Andasol-3 Kraftwerks in Abschnitt 2.1.1 die Messergebnisse von insgesamt fünf Pyrheliometerstationen genutzt, um den durchschnittlichen DNI zu bestimmen. Jedoch kam es auch bei einer hohen Anzahl an Messstationen zu Problematiken, sobald die räumliche Variabilität zunahm. Gleichwohl ist der berechnete durchschnittliche DNI von fünf Stationen präziser als der von zwei Stationen.

Der zweite Faktor, der den Nutzen steigert, ist, wie bereits erwähnt, ein erhöhtes Aufkommen räumlicher Variabilität. Tendiert der DNI über den Tagesverlauf zu einer homogenen Bestrahlung des Solarfelds, ist die Anzahl an Messstationen irrelevant und die Berechnung des DNI über die Strahlungskarte belanglos.

Dennoch ist festzuhalten, dass die Berechnung der adaptiven Regelparameter der Pumpregelung (Gleichung 2.9) sowie des theoretisch benötigten Massenstroms durch die Vorsteuerung „FF Loop“ (Gleichung 2.11) durch eine inakurate Bestimmung des durchschnittlichen DNI zu einem fehlerhaft eingestellten Pumpdruck führt. Folglich führt das Vorhandensein von Strahlungskarten ohne weitere Auswertung bereits zu einer Verbesserung der Regelung des Parabolrinnenkraftwerks bei vermehrten Wolkenaufkommen. Die aus der Erweiterung des adaptiven Pumpreglers sowie der Vorsteuerung durch Verwendung der Strahlungskarte hervorgehende Regelung wird im weiteren Verlauf als „adaptiver Regler mit Karte“ bezeichnet. Dieser bildet die Basis, die in den folgenden Schritten an die klassenspezifischen Probleme angepasst wird.

4.3. Entwurf klassenspezifischer Regelungsstrategien

Das Ziel der klassenspezifischen Regelung ist es, dass für die aktuell klassifizierte Strahlungskarte die entsprechenden klassenspezifischen Regelparameter Anwendung finden, die als bestmögliche für diese Klasse definiert wurden. Für eine Bestimmung der bestmöglichen Regelungsparameter jeder Klasse muss diese jedoch zuvor mittels des Referenzreglers simuliert, entstehende Probleme erkannt und eine Lösung abgeleitet werden. Dafür wurden alle zur Verfügung stehenden Tage durch sowohl das zeitliche als auch das räumliche Verfahren klassifiziert. So können die aufeinanderfolgenden Strahlungskarten, die eine identische Klasse abbilden, in VSF untersucht und das optimale Reglerverhalten bestimmt werden. Der bereits bekannte 9. September 2015 bildet alle für die Regelung relevanten Klassen ab, sodass eine Demonstration der Auswirkung der optimierten Regelung für jede Klasse anhand dieses Tags möglich ist.

Wichtig ist, dass die grundsätzliche Regelung während des Optimierungsprozesses nicht verändert wird, sodass die Blockschaltbilder aus Abschnitt 2.2.2 auch für die klassenspezifische Regelung gültig sind. Vielmehr beschränkt sich der Optimierungsprozess auf eine Beeinflussung der proportionalen Verstärkungsfaktoren der unterschiedlichen PI-Regler, also des Pumpreglers, des Fokussierungsreglers und der manipulative Vorsteuerung „FB Loop“, über den Parameter T_c (Gleichung 2.10). Wie Abbildung 4.1 aufzeigt, muss die Auswahl des Reglerverhaltens über T_c mit einer gewissen Sorgfalt getroffen werden, da dies zu einem grenzstabilen oder gar instabilen Verhalten führen kann. Die Anpassung des Verhaltens ist besonders im Falle des Fokussierungsreglers von Bedeutung, da anders als beim adaptiven Pumpregler die Regelparameter nicht über den DNI bestimmt werden, sondern ständig konstant bleiben.

Die Regelparameter des Fokussierungsreglers können nicht von der Referenzregelung übernommen werden, da diese mit der Beschränkung $0.1 \leq T_c \leq 10$ nicht die benötigten proportionalen Verstärkungsfaktoren erreichen, um in allen Klassen optimal zu agieren, weshalb eine Neuauslegung mittels des Ziegler–Nichols Verfahrens durchgeführt wird. Hierfür muss der Regelkreis über einen P-Regler geschlossen und der proportionale Verstärkungsfaktor solange erhöht, bis der Ausgang des Systems, also die Austrittstemperatur, eine Dauerschwingung ausführt. Während der gesamten Auslegung wirken dabei ein konstanter Pumpdruck sowie DNI auf den Eingang des Systems. Der proportionale Verstärkungsfaktor, bei dem die Austrittstemperatur die Dauerschwingung aufweist und das System letztlich als grenzstabil zu bezeichnen ist, wird als $K_{P,Krit}$ bezeichnet. Zudem beschreibt die Dauer einer Periode der Dauerschwingung den Faktor T_{Krit} [30].

$$K_P = 0,45 \cdot K_{P,Krit} \quad (4.5)$$

$$T_p = 0,85 \cdot T_{Krit} \quad (4.6)$$

Über die Gleichungen 4.5 und 4.6 lassen sich anschließend die Werte für den proportionalen Verstärkungsfaktor K_p und die Nachstellzeit T_p des PI-Reglers bestimmen. Die Parameter werden für ein moderates Verhalten ausgelegt, sodass dies das Standardverhalten des Reglers beschreibt (Tabelle 4.1). Durch den neu ausgelegten proportionalen Verstärkungsfaktor können über $0.1 \leq T_c \leq 10$ nun die in allen Klassen benötigten Verstärkungsfaktoren erzeugt werden. Das bedeutet zudem, dass der neu ausgelegte Fokusregler während dieser über $T_c = 1$ ein moderates Verhalten beschreibt bereits aggressiver agiert, als der Referenzregler während eines moderaten Verhaltens.

Tabelle 4.1.: Ermittelte Regelparameter der Fokussierungsregelung mittels des Ziegler–Nichols Verfahrens

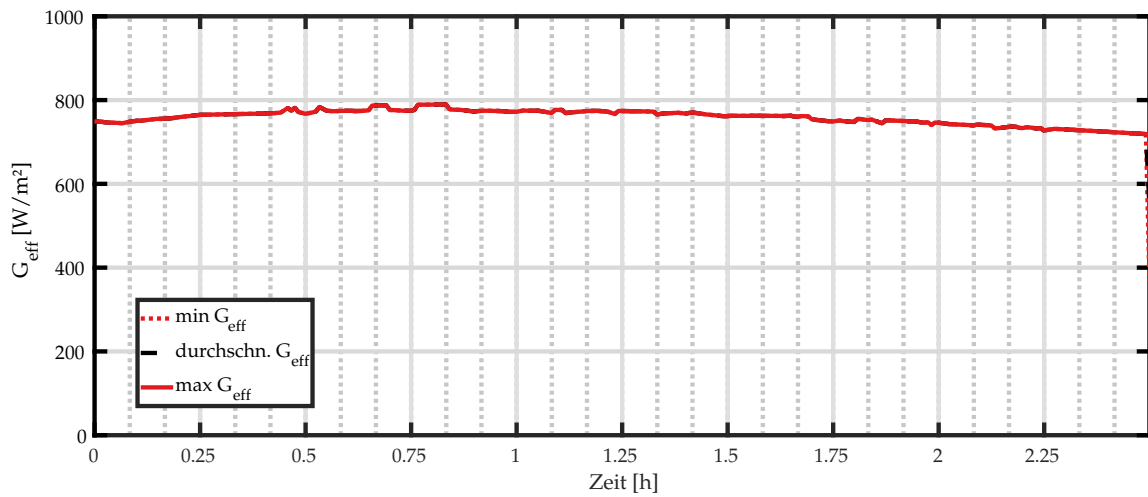
Regelung	Parameter	Wert
Fokussierungsregelung	K_p	$-2 \frac{^{\circ}C}{deg}$
	T_p	50 s
	θ_p	Simulationszeit
	Verhalten	moderat

Clearsky

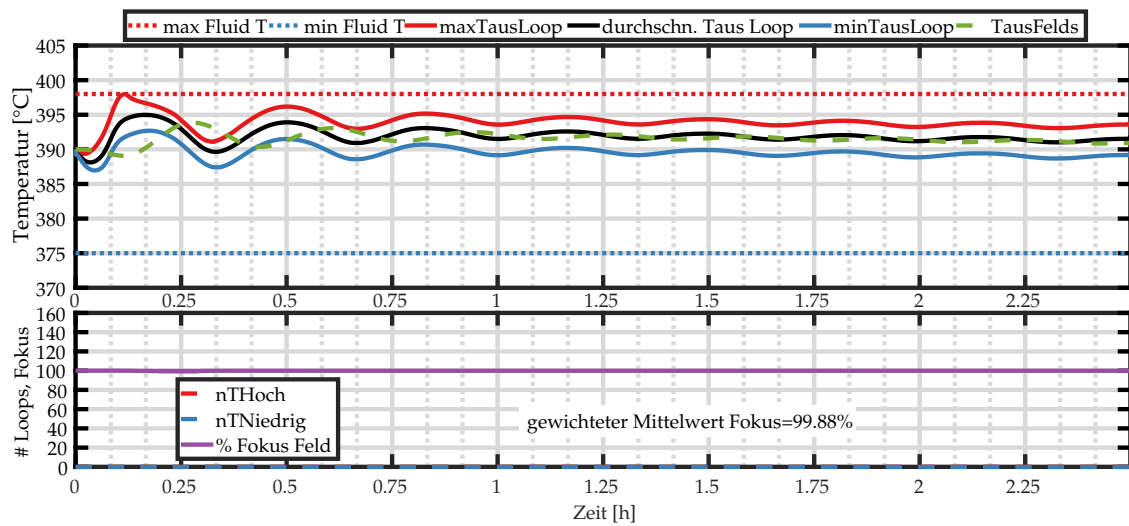
Die dargestellte Abbildung 4.4 beschreibt den Verlauf der, für die Auswertung der Regelung wesentlichen Prozessparameter der Klasse „Clearsky“ am 9. September 2015. Die Klasse „Clearsky“ stellt den Regelfall des DNI-Verlaufs dar. Trotz eines DNI ohne Variabilität weist G_{eff} , wie Abbildung 4.4a darstellt, nur für sehr kurze Zeiträume einen konstanten Verlauf auf. Dies hängt mit dem Sonnenstand am Himmel zusammen, denn durch diese entstehen in Abhängigkeit der Sonnenposition veränderte IAM- und Kosinus-Verluste, die den Verlauf des Clearsky-DNI beeinflussen. Die Auswirkung einer minimalen Veränderung des DNI auf die Temperatur wurde bereits in Abbildung 4.3 demonstriert. So führt ein Sprung des DNI um $10 \frac{W}{m^2}$ zu einer gewissen Änderung der Temperaturen des Fluids. Für den Regler bedeutet dies, dass die Regelabweichung der Austrittstemperatur des Solarfelds niemals mittels konstanter Stellgrößen über einen längeren Zeitraum ausregelbar ist.

Gemäß der formulierten Regelziele ist es im Sinne der Ertragsmaximierung, die maximal mögliche Strahlung auf das Absorberrohr zu fokussieren, also eine vollständige Fokussierung zu gewährleisten. Die relevante Stellgröße stellt somit lediglich der Pumpdruck dar. Abbildung 4.4b beschreibt den Verlauf der simulierten Austrittstemperaturen sowie die gewichtete mittlere Fokussierung aller Kollektoren über die Zeit. Die Verläufe repräsentieren die Ergebnisse der Referenzregelung für den abgebildeten G_{eff} . Das aggressiv eingestellte Verhalten des Pumpreglers führt zu einem zu hohen proportionalen Verstärkungsfaktor, sodass der Regler die Ausgangstemperatur nicht an die Führungsgröße angleichen kann. Stattdessen schwingt das PT-2 System über einen langen Zeitraum. Prinzipiell berechnet die Vorsteuerung „FF Loop“ der Pumpregelung über den durchschnittlichen DNI der Strahlungskarte, da die Bestrahlung innerhalb dieser Klasse vollständig homogen ist, bereits einen näherungsweise optimalen Pumdruck. Genauso leitet der adaptive Regler seine optimalen Regelparameter ebenfalls von der Strahlungskarte ab. Eine nachträgliche Veränderung des proportionalen Verstärkungsfaktors über eine aggressive Einstellung ist dementsprechend nicht notwendig. Zusätzlich erreicht die Referenzregelung keine vollständige Fokussierung, was den Ertrag des Kraftwerks geringfügig reduziert.

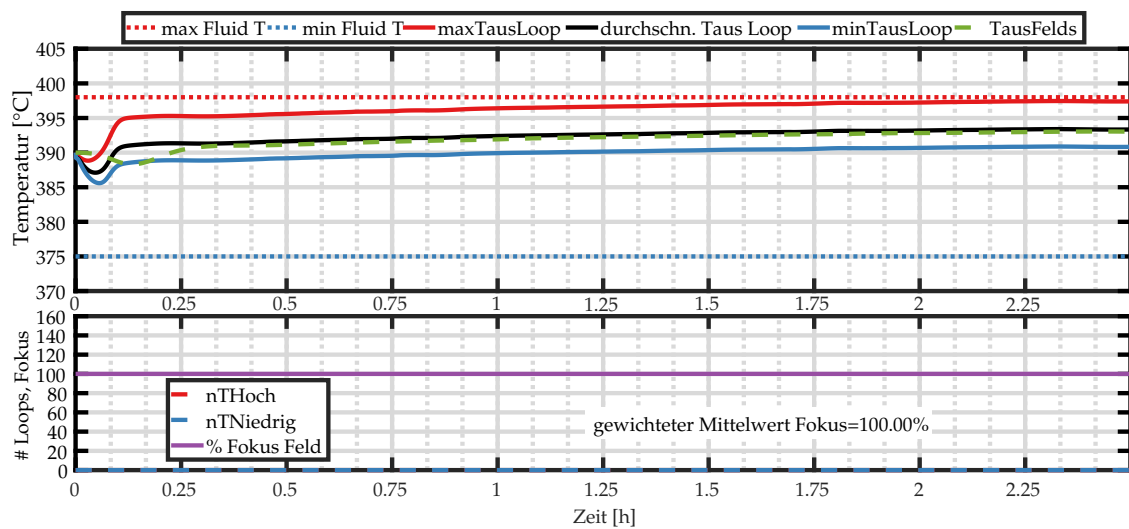
Die daraus folgenden Optimierungsschritte sind somit Anpassungen der Einstellung des adaptiven Reglers sowie des neu ausgelegten Fokusreglers auf einen moderates Verhalten. Um sicherzustellen, dass die Austrittstemperatur ausschließlich über den Pumdruck geregelt wird, ist ein sehr aggressives Verhalten der manipulativen Vorsteuerung „FB Loop“ sinnvoll. Im Falle einer Defokussierung zwingt diese den Pumpregler zu einem erhöhten Druck, sodass eine erneute maximale Fokussierung möglich ist. Diese geringfügigen Anpassungen der Regelung führen zu einer wesentlich effizienteren Regelung (Abbildung 4.4c). Statt wie zuvor die Fokussierungsrate minimal zu reduzieren, erreicht diese nun über den gesamten Zeitraum einen Wert von 100 %. Zudem weisen die abgebildeten Temperaturen keine Schwingungen auf, sodass sich eine konstante Austrittstemperatur ergibt. Insgesamt kann unter Verwendung des spezifischen Regelungsansatzes eine verbesserte Regelgüte für die Klasse „Clearsky“ verzeichnet werden.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4.4.: Darstellung der VSF-Simulationsergebnisse für einen Ausschnitt des DNI-Verlaufs der Klasse Clearsky am 09.09.2015 a) Effektiver DNI über die Zeit. b) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des Referenzreglers. c) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des optimierten Reglers.

Helle Schatten

Abbildung 4.5a beschreibt den als „Helle Schatten“ klassifizierten Verlauf von G_{eff} am 9. September 2015. Die Klasse „Helle Schatten“ stellt einen Sonderfall des Clearsky dar, denn der DNI der beschatteten Fläche weicht nur leicht von dem des Clearsky-DNI ab. Im Verlauf weicht der durchschnittliche G_{eff} von dem maximalen nur zu gewissen Zeiten ab, nämlich dann, wenn eine räumliche Variabilität auftritt. Durch die Verwendung von gleitenden Mittelwerten entsteht so eine Klassifizierung als helle Schatten, obwohl offensichtlich auch zu einer Vielzahl an Zeitpunkten Clearsky-Bedingung herrschen.

Eine Simulation dieses Zeitausschnitts mittels der Referenzregelung führt zu den in Abbildung 4.5b abgebildeten Verläufen der Austrittstemperaturen sowie der gemittelten Fokussierungsrate aller Kollektoren. Grundsätzlich beschreibt die Feldaustrittstemperatur einen wesentlich konstanteren Verlauf als im Falle der Clearsky-Klasse, der erst kurz vor 0,25 Stunden eine deutlichere Abweichung von der Führungsgröße aufweist. Zur selben Zeit überhitzt eine geringe Anzahl an Loops, sodass bei diesen eine Notfalldefokussierung ausgeführt wird. Dies ist die Folge der drei kurz hintereinander auftretenden Beschattungen. Dadurch, dass die Anzahl überhitzter Loops gering ist, schlägt sich dies nur geringfügig in der mittleren Fokussierungsrate nieder. Eine sprunghafte Defokussierung führt neben einer geringeren Fokussierung jedoch auch immer zu einer kurzzeitigen deutlichen Abweichung der Temperatur gegenüber der gewünschten Temperatur innerhalb dieses einen Loops. Zwar ist die Anzahl an überhitzter Loops in dem hier vorgestellten Klassenbeispiel gering, dies kann jedoch genauso bei einer höheren Anzahl passieren, sodass die Auswirkung der Notfalldefokussierungen merklich in der Austrittstemperatur zu sehen wäre.

Die Vorsteuerung „FF Loop“ berechnet anhand des durchschnittlichen DNI einen theoretischen Pumpdruck, der auf Grund der räumlichen Variabilität nur für einige Loops angemessen ist. So kommt es in der Folge zu einer Überhitzung bei den Loops, die mit dem maximalen G_{eff} bestrahlt werden, da hier das Fluid mit einem zu geringen Massenstrom durch das Absorberrohr strömt und somit zu lange unter dem Einfluss des hohen G_{eff} steht. Genauso verwendet der adaptive Regler Regelparameter, die für den durchschnittlich wirkenden DNI ausgelegt sind, was grundsätzlich, wie es die Abbildung beschreibt, unter Verwendung eines aggressiven Verhaltens für die Regelung der Austrittstemperatur des Solarfelds zielführend ist. Jedoch ist die Konsequenz eine Überhitzung, die zu einer Verschlechterung der Regelgüte führt. Dementsprechend ist der abgeleitete Lösungsansatz unter den vorherrschenden Bedingungen, der Stellgröße Fokussierungsrate mehr Einfluss zu gewähren. In der Referenzregelung reicht das Verhältnis, das der proportionale Verstärkungsfaktor beschreibt, nicht aus, um die Kollektoren in der verfügbaren Zeit ausreichend zu defokussieren. Da durch die Neuauslegung des Fokusreglers der Verstärkungsfaktor jedoch bereits ein aggressiveres Verhältnis während eines moderaten Verhaltens beschreibt, reicht, wie bei „Clearsky“, auch hier die Auswahl eines moderaten Verhaltens aus. So kann durch die klassenspezifische Regelung die Überhitzung nahezu vollständig verhindert werden, wodurch die Austrittstemperatur des Solarfelds eine noch bessere Regelgüte als zuvor aufweist (Abbildung 4.5c).

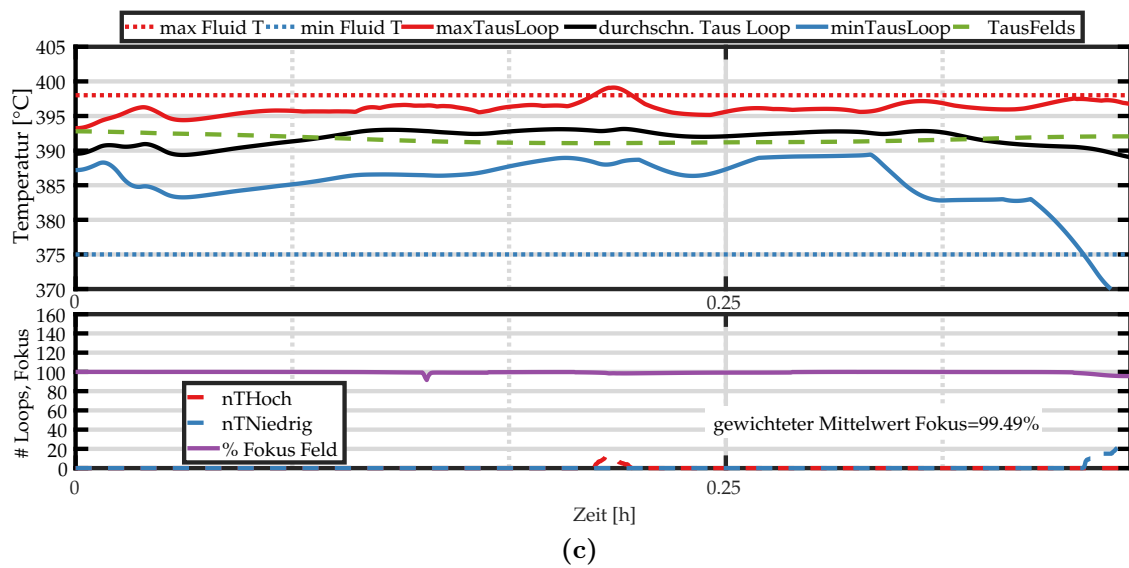
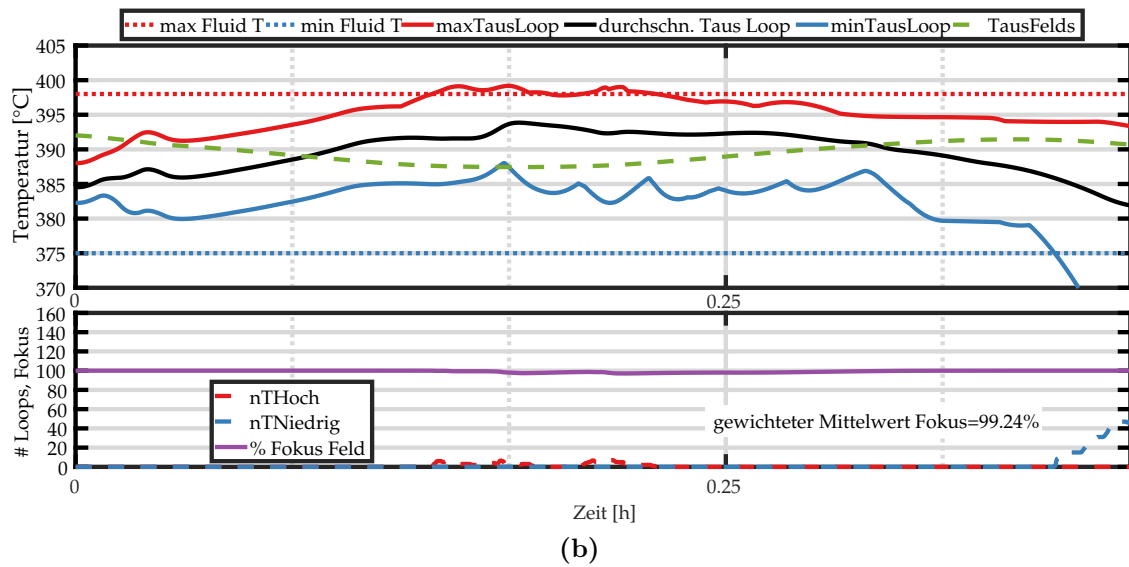
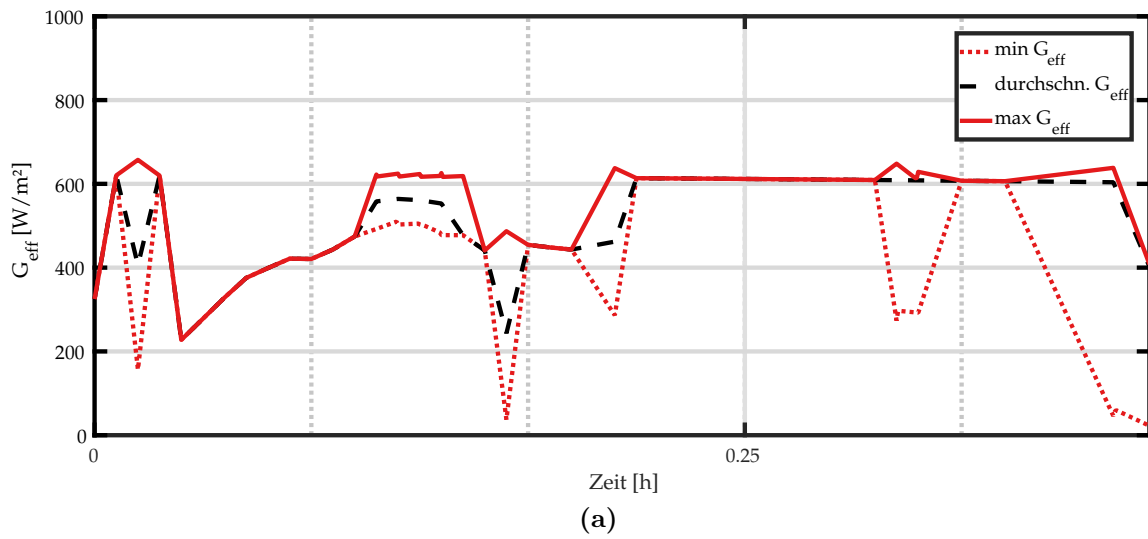
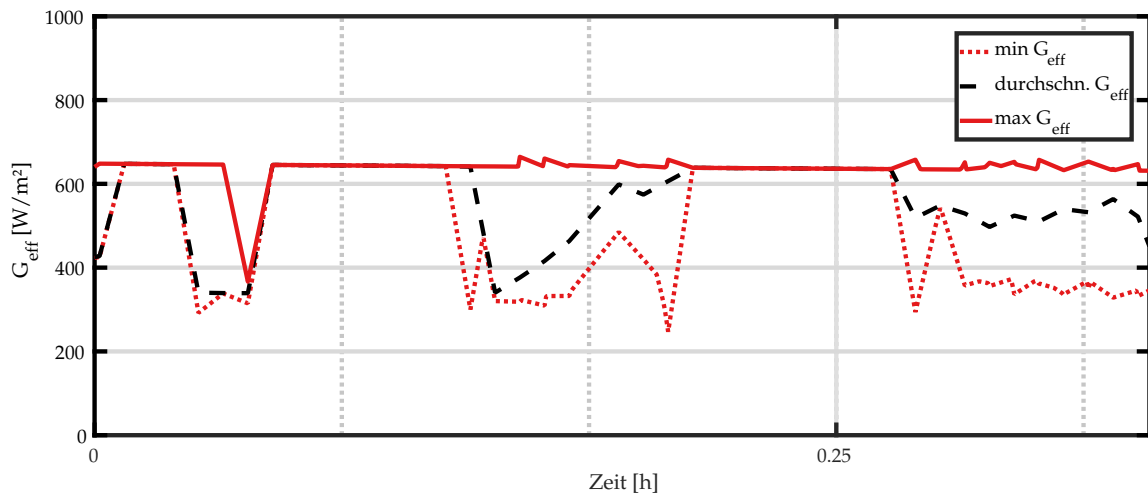


Abbildung 4.5.: Darstellung der VSF-Simulationsergebnisse für einen Ausschnitt des DNI-Verlaufs der Klasse helle Schatten am 09.09.2015 a) Effektiver DNI über die Zeit. b) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des Referenzreglers. c) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des optimierten Reglers.

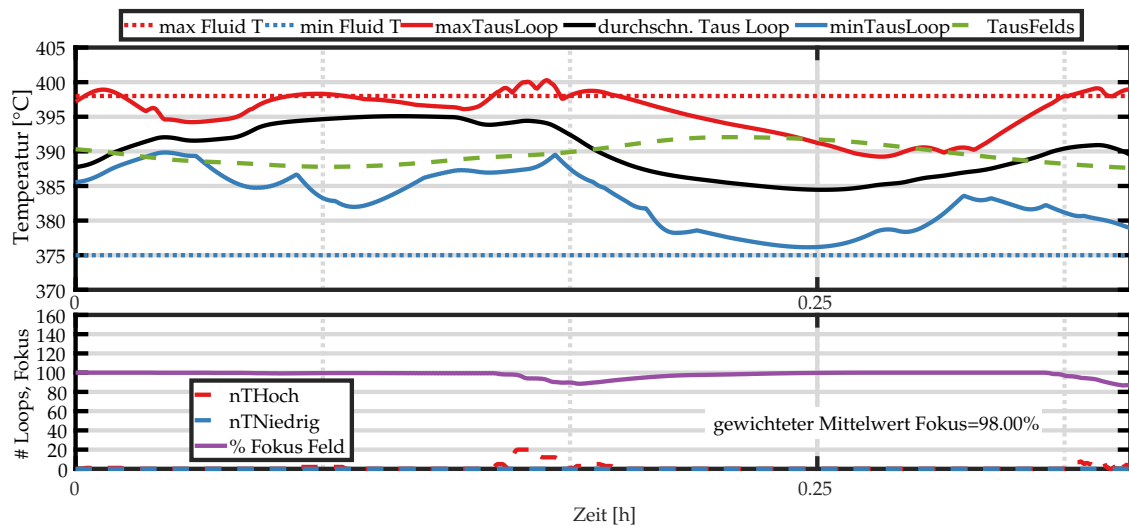
Kleine Schatten

Die Auswahl der verwendeten Klassen, die in Abschnitt 3.3 getroffen wurde, führen zu zwei Möglichkeiten der Klasse „Kleine Schatten“. Der in Abbildung 4.6a dargestellte Verlauf von G_{eff} beschreibt den Verlauf der Klasse „Kleine Schatten“ mit einer erhöhten zeitlichen Variabilität, also Klasse Vier des zeitlichen Verfahrens. Die Ergebnisse der Simulation dieses Verlaufs mittels der Referenzregelung sind in Abbildung 4.6b dargestellt. Eine Besonderheit, die der Verlauf von G_{eff} aufweist, sind die schnellen Sprünge des DNI, die zu starken Flanken führen. In dem hier dargestellten Fall wird der DNI, der auf den beschatteten Teil des Feldes wirkt, durch Wolkenzüge reduziert, sodass diese plötzlich $200 \frac{W}{m^2}$ weniger erfahren als zuvor. Die Regelung reagiert auf diesen Sprung mit einem geringeren Pumpdruck, um eine Reduktion der Austrittstemperatur des Solarfelds zu verhindern. Sobald die Wolken über das Solarfeld gezogen sind und das gesamte Solarfeld wieder vollständig homogen bestrahlt wird, steigt der DNI in einer sehr kurzen Zeitspanne. Dieser sprunghafte Wechsel bewirkt, dass die Loops einen zuvor völlig unvorhersehbaren Pumpdruck benötigen. Aufgrund der Totzeit, die auftritt, bis ein neu gestellter Pumpdruck eine Auswirkung auf die Looptemperatur aufweist, ist eine Regelung über diese Stellgröße nicht sinnvoll. Deshalb stellt an dieser Stelle die Fokussierung die primäre Stellgröße der Regelung dar. Im Falle der Referenzregelung führt das den proportionalen Verstärkungsfaktor beschreibende Verhältnis, wie auch schon bei der Klasse „Helle Schatten“, zu einem zu schwachen Eingreifen. Die Konsequenz ist auch hier eine häufige Überschreitung der zulässigen Fluidtemperatur in den Loops, sobald G_{eff} seinen ursprünglichen Wert erreicht. Da in diesem Beispiel jedoch bis zu 20 Loops zeitgleich überhitzen und die Kollektoren zur Defokussierung zwingen, ist ein Abfall der durchschnittlichen Loopaustrittstemperatur zu erkennen. Durch die Totzeit äußert sich die Notfalldefokussierung der Loops jedoch erst zum Zeitpunkt $t = 0,25$ in einer abfallenden Temperatur am Austritt des Solarfelds. Ähnlich zu der Klasse „Helle Schatten“, kann die Regelabweichung der Austrittstemperatur des Solarfelds trotz der massiven Sprünge des DNI gering gehalten werden. Lediglich eine minimale Schwingungstendenz ist im Verlauf der Austrittstemperatur des Solarfelds zu erkennen, welche hauptsächlich durch Defokussierungsprozesse ausgelöst wird.

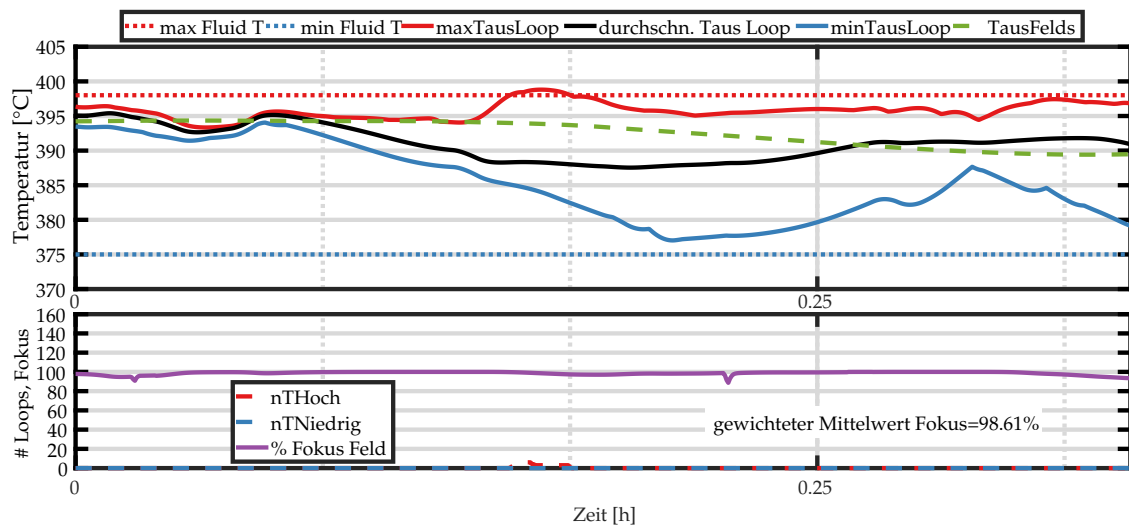
Für die Regelstrategie der Klasse „Kleine Schatten“, die mit einer hohen zeitlichen Variabilität einhergeht, ist ein aggressives Verhalten des adaptiven Reglers, so wie es der Referenzregler aufzeigt, für die Stabilisierung der Austrittstemperatur sinnvoll. Statt die Fokussierungsregelung jedoch noch immer nur als sekundäre Stellgröße zu betrachten, muss diese in der Lage sein, bevorstehende sprunghafte Wechsel des DNI auszuregulieren und so das Fluid vor dem Überhitzen zu bewahren. Daher agiert in der Folge der neu ausgelegte Fokussierungsregler ebenfalls mit einem aggressiven Verhalten. Zudem ist die Verwendung der Vorsteuerung „FB Loop“ nicht zielführend, da eine zusätzliche Manipulation der Regelabweichung das Risiko einer Überhitzung erhöht. Diese Anpassungen führen zu einer deutlichen Reduktion überhitzter Loops, was zeitgleich eine stabilere Austrittstemperatur des Solarfelds bedeutet (Abbildung 4.6c). Interessant ist zudem, dass durch die Verhinderung der Notfalldefokussierungen durch eine agilere Fokusregelung die mittlere Fokussierungsrate höher ist als zuvor.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4.6.: Darstellung der VSF-Simulationsergebnisse für einen Ausschnitt des DNI-Verlaufs der Klasse kleine Schatten am 09.09.2015 a) Effektiver DNI über die Zeit. b) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des Referenzreglers. c) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des optimierten Reglers.

Große Schatten

Genauso wie die Klasse „Kleine Schatten“, kann auch die Klasse „Große Schatten“, eine hohe oder eine geringe zeitliche Variabilität aufweisen. Der in Abbildung 4.7a dargestellte Verlauf von G_{eff} wurde durch das räumliche Verfahren als große Schatten klassifiziert. Zudem beschreibt das zeitliche Verfahren den Beginn des Verlaufs bis $t = 0,25$ h mit einer geringen zeitlichen Variabilität, diese nimmt jedoch um den Zeitpunkt von $t = 0,5$ h deutlich zu. Hier klassifiziert das zeitliche Verfahren die Klasse Sechs. Dementsprechend bildet der Verlauf beide berücksichtigten Möglichkeiten der Klasse „Große Schatten“ ab.

Die Simulation des Verlaufs mittels der Referenzregelung führt zu den in Abbildung 4.7b dargestellten Temperaturverläufen sowie dem Verlauf der gemittelten Fokussierungsrate. Es ist auffallend, dass während des gesamten Zeitintervalls nahezu keine Überhitzung des Fluids zu verzeichnen ist. Jedoch ist im Verlauf der Austrittstemperatur des Solarfelds eine deutliche Schwingung zu erkennen. Zudem liegt diese oftmals unter dem Sollwert von $393\text{ }^{\circ}\text{C}$, sodass es über den gesamten Verlauf häufig zu einer erhöhten Regelabweichung kommt. Bemerkenswert ist, dass der Regler innerhalb des Zeitbereichs, der eine hohe zeitliche Variabilität aufweist, also um $t = 0,5$, die Austrittstemperatur trotz der wiederholten Sprünge im Verlauf des DNI besser stabilisiert, als zu den Zeiten, zu denen eine geringe zeitliche Variabilität herrscht.

Ähnlich wie bei der Klasse „Kleine Schatten“, erweist sich für die klassenspezifische Regelung der „Großen Schatten“, ein aggressives Verhalten sowohl des adaptiven Pumpreglers als auch der Fokusregelung zu den Zeiten, zu denen die zeitliche Variabilität hoch ist, als effektivste. Zwar ist der Referenzregler in dem hier beschriebenen Beispiel im Stande, die Temperaturen unterhalb der festgelegten zulässigen maximal zu halten, jedoch ist dies über die 30 untersuchten Tage nicht immer der Fall. In Bereichen, die eine geringe zeitliche Variabilität aufweisen, also in diesem Fall zu Beginn der Simulation bis zum Zeitpunkt $t = 0,25$ h, ist ein moderates Verhalten des Pumpreglers vorgesehen. Wie zuvor wird auch in dieser Klasse die Vorsteuerung „FB Loop“ abgeschaltet, sodass eine Defokussierung der Kollektoren über den gesamten Zeitraum der Störung möglich ist, ohne dass die Vorsteuerung die Kollektoren wieder zu erhöhter Fokussierung zwingt.

Die Auswirkung der beschriebenen Regelstrategie zeigt sich in Abbildung 4.7c. Eine negative Konsequenz der Aggressivität des Fokusreglers ist eine geringere mittlere Fokussierungsrate über den untersuchten Verlauf. Dies bewirkt jedoch eine durchweg geringere Regelabweichung der Austrittstemperatur des Solarfelds und eine damit verbundene bessere Regelgüte des Reglers. Eine Berechnung des mittleren quadratischen Fehlers (MQF) zwischen Solltemperatur und simulierter Austrittstemperatur verdeutlicht dies. So weist die Austrittstemperatur im Falle des Referenzreglers einen MQF von $3,41\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Hingegen liegt dieser im Falle des optimierten Reglers bei lediglich $1,36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Durch einen höheren Einfluss der Fokusregelung konnte demnach im Sinne der Regelgüte eine wesentliche Verbesserung verzeichnet werden.

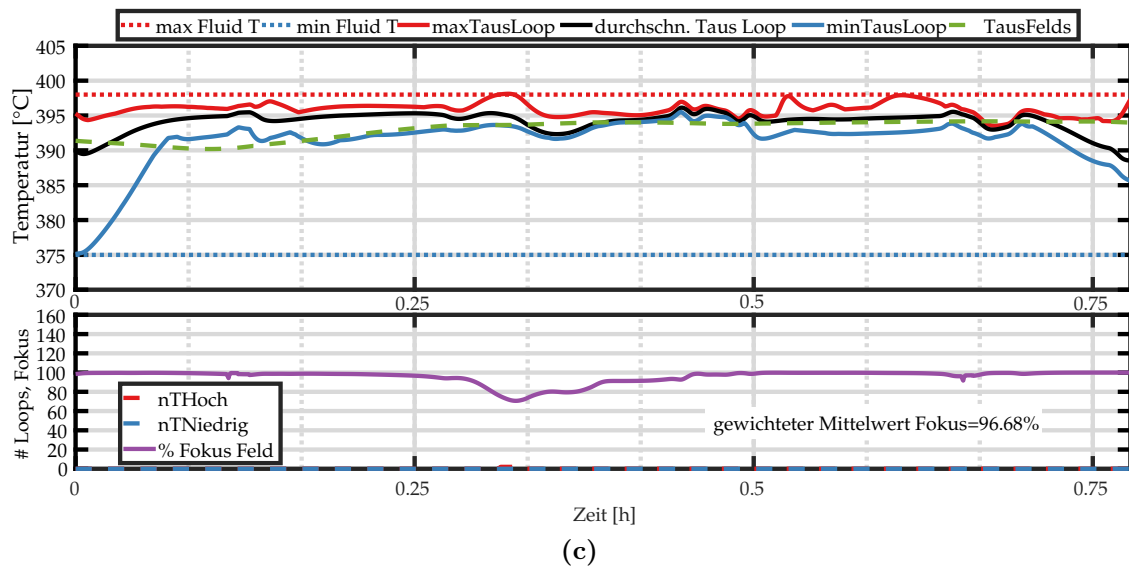
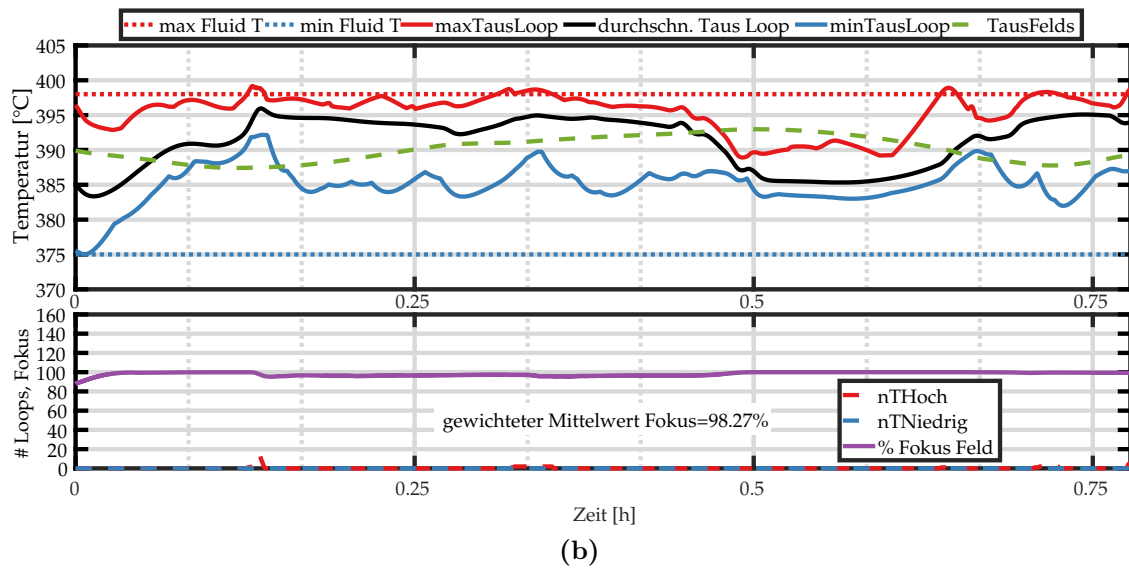
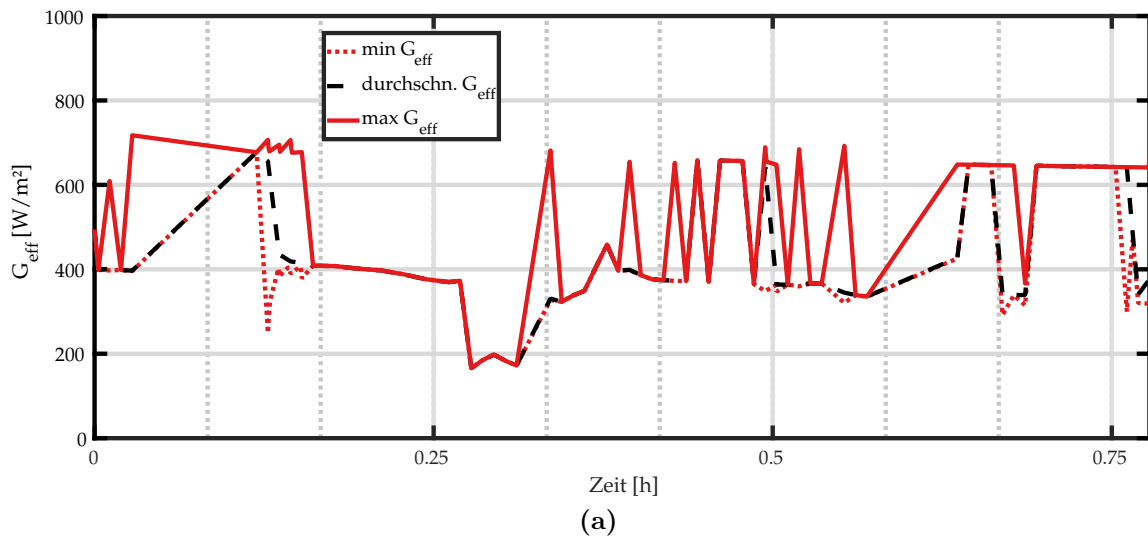


Abbildung 4.7.: Darstellung der VSF-Simulationsergebnisse für einen Ausschnitt des DNI-Verlaufs der Klasse große Schatten am 09.09.2015 a) Effektiver DNI über die Zeit. b) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des Referenzreglers. c) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des optimierten Reglers.

Starker Overcast

Die Klasse des „Starken Overcast“ beschreibt die vollständige Beschattung des Solarfeldes, sodass nur noch ein sehr geringer bis kein G_{eff} wirkt. Für das in Abbildung 4.8a vorgestellte Beispiel beschreibt G_{eff} einen sehr konstanten Verlauf, der lediglich ab $t = 0.25$ h eine Änderung aufweist.

Die Ergebnisse der Simulation mittels des Referenzreglers zeigen für diesen Ausschnitt eine sehr konstante Austrittstemperatur des Solarfeldes, die jedoch über den gesamten Zeitraum eine gewisse Regelabweichung aufweist (Abbildung 4.8b). Die Regelung ist trotz eines vollständig homogen bestrahlten Solarfeldes, dass keine Variabilität aufweist, nicht im Stande, die Regelabweichung auszuregeln. Des Weiteren steigt die höchste Loopaustrittstemperatur auf einen Wert nahe der maximal zulässigen, sodass eine Notfalldefokussierung unumgänglich wäre, wenn G_{eff} im weiteren Verlauf sprunghaft ansteigt.

Prinzipiell sind in dieser Klasse kaum Anpassungen notwendig. Jedoch ist es im Falle eines homogen bestrahlten Felds sinnvoll, dass die Vorsteuerung „FF Loop“ ohne große Einwirkung des adaptiven Reglers den Pumpdruck stellt. Anstatt dass der adaptive Pumpregler aggressiv gegen die Regelabweichung Anpassungen am Pumpdruck vornimmt, soll dieser lediglich durch ein moderates Verhalten die restliche Regelabweichung ausregeln. Um die Looptemperaturen vor möglichen Überhitzungen zu schützen, bleibt das Verhalten des Fokusreglers aggressiv. Die Vorsteuerung „FB Loop“ bleibt weiterhin ausgeschaltet. Die Zeitfenster, in denen die Klasse „Starker Overcast“ auftritt, sind immer kurz, sodass trotz eines stabilen Verlaufs von G_{eff} der Gewinn an zusätzlicher Fokussierung durch Vorsteuerung sehr gering ist.

Eine Simulation der angepassten Regelung für das vorliegende Klassenbeispiel führt zu den Ergebnissen, die Abbildung 4.8c darstellt. Insgesamt kann die Regelung die Austrittstemperatur von $393\text{ }^{\circ}\text{C}$ über den gesamten Verlauf halten, sodass die Regelabweichung im Vergleich zu der Referenzregelung wesentlich geringer ausfällt. Eine Berechnung des MQF für beide Verläufe verdeutlicht dies. So erreicht die optimierte Regelung einen Fehler von $0,24\text{ }^{\circ}\text{C}$, wohingegen die Verwendung der Referenzregelung zu einem Fehler von $2,87\text{ }^{\circ}\text{C}$ führt. Im Sinne der Regelgüte erreicht die optimierte Regelung ein signifikant besseres Ergebnis, jedoch ist die Referenzregelung im Stande, eine minimal höhere Fokussierungsrate zu erreichen. Die verbesserte Regelung defokussiert, aufgrund des aggressiveren Verhaltens, sobald der Verlauf von G_{eff} eine Steigung aufweist ($t = 0.25$ h). Einerseits erreicht die höchste Looptemperatur so einen unkritischeren Zustand, als es bei der Referenzregelung der Fall ist, andererseits greift der Fokusregler in diesem Beispiel sehr frühzeitig ein. Die Untersuchung aller Zeitausschnitte, in denen die Klasse „Starker Overcast“ auftritt, zeigte jedoch, dass ein aggressives Verhalten des Fokusreglers für die Erreichung einer höheren Regelgüte sinnvoll ist.

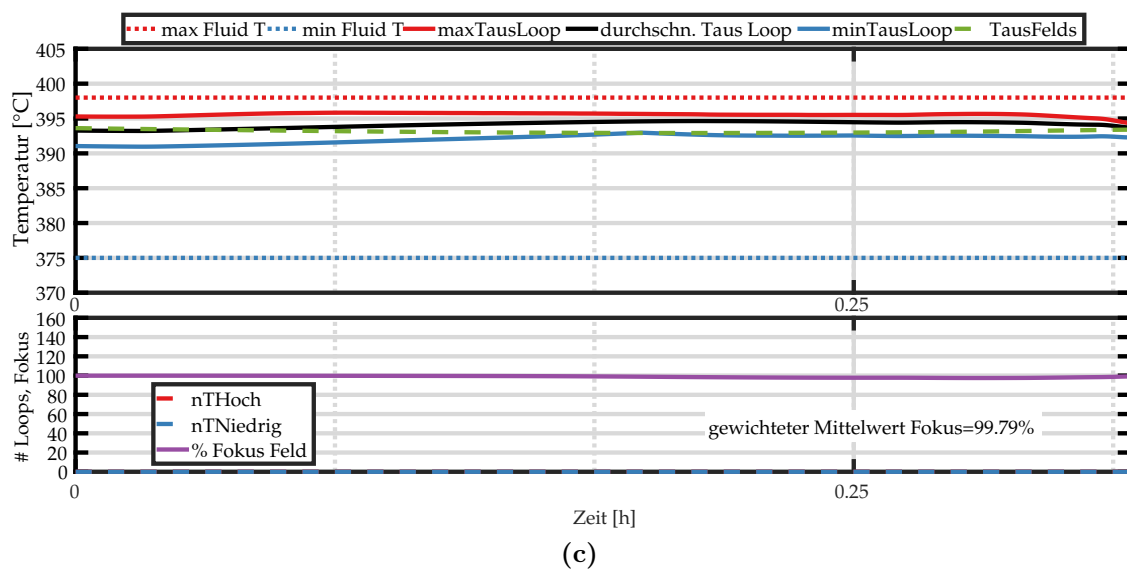
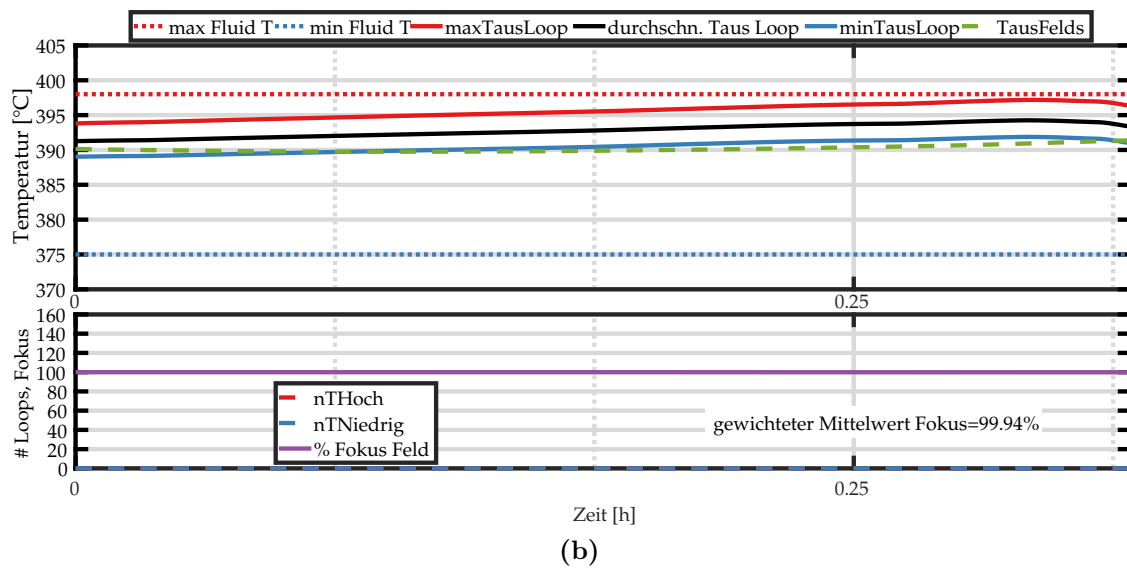
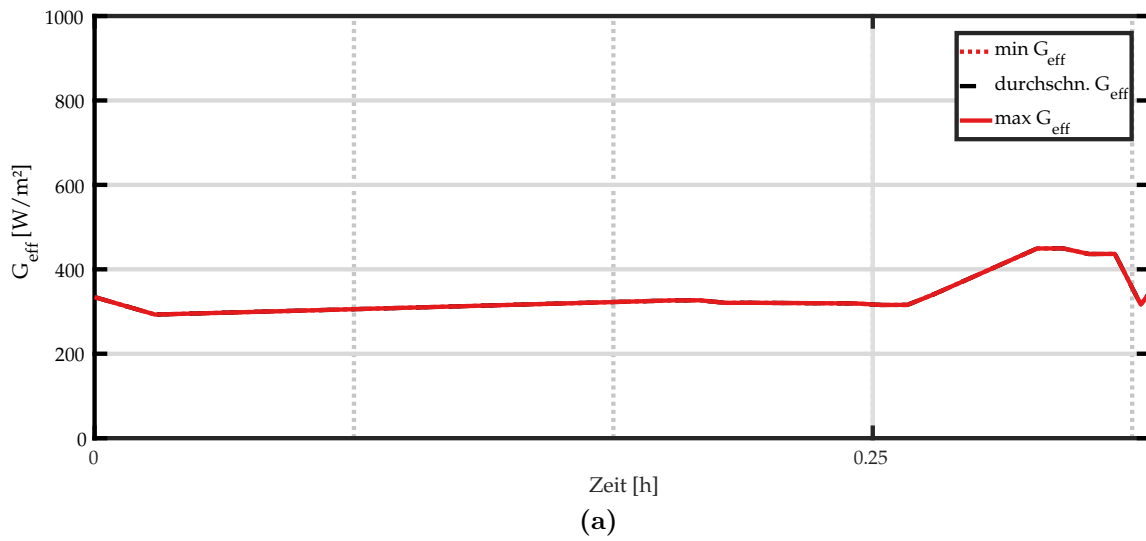


Abbildung 4.8.: Darstellung der VSF-Simulationsergebnisse für einen Ausschnitt des DNI-Verlaufs der Klasse starker Overcast am 09.09.2015 a) Effektiver DNI über die Zeit. b) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des Referenzreglers. c) VSF-Simulationsergebnisse unter Verwendung des optimierten Reglers.

Einfluss der zeitlichen Klassen

Im Fall der großen Schatten wurde der Einfluss der zeitlichen Klassen auf die Regelstrategie bereits angerissen. Insgesamt zeigen die Untersuchungen der 30 Tage, dass für die Minimierung der Regelabweichung während einer hohen zeitlichen Variabilität, also eines sehr sprunghaften Verhaltens des DNI, eine aggressivere Verhaltensweise des Pumpreglers sinnvoll ist. So ist dieser in der Lage, die Regelabweichung, die durch die Vorsteuerung „FF Loop“ nicht ausgeregelt werden kann, bestmöglich zu minimieren. Das Problem, das an dieser Stelle verbleibt, ist die Totzeit, die zwischen dem Zeitpunkt der Pumpdruckveränderung durch den adaptiven Pumpregler und dem einer sichtbaren Wirkung vergeht. Da der adaptive Pumpregler die Druckänderung anhand der Regelabweichung bestimmt, ist dieser im Falle einer hohen zeitlichen Variabilität zu langsam, um die Temperatur zu stabilisieren, weshalb während einer hohen zeitlichen Variabilität ein aggressiver Fokusregler ebenfalls sinnvoll ist. Dadurch kann dieser eingreifen, wenn die Pumpregelung aufgrund der vorherrschenden Totzeit versagt. Dementsprechend gilt, sobald die räumliche Klasse „Kleine Schatten“ zeitgleich mit der zeitlichen Klasse Vier klassifiziert wird, für beide Regler ein aggressives Verhalten. Genauso gilt dies, wie auch schon innerhalb des Abschnitts beschrieben, für die räumliche Klasse „Große Schatten“.

Vergleich: Regler mit dem Ziel Regelgüte

Die, anhand der zuvor dargestellten Klassen, demonstrierten Regelstrategien beschreiben den Regler, der im Folgenden als „Regler Ziel Regelgüte“ bezeichnet wird. Die entsprechenden Regelparameter sind zusammengefasst in Tabelle A.2 im Anhang aufgeführt.

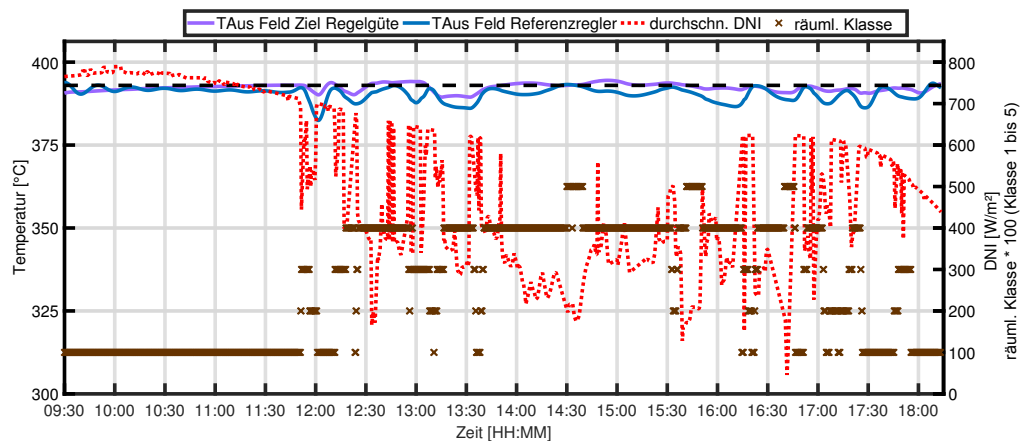


Abbildung 4.9.: Vergleich der Austrittstemperatur unter Verwendung des Referenzreglers und des optimierten klassenspezifischen Reglers mit dem Ziel einer hohen Regelgüte.

Eine Simulation des 9. September 2015 unter Verwendung beider Regler, also des Referenzreglers und des optimierten Reglers führt zu signifikanten Unterschieden in der Austrittstemperatur (Abbildung 4.9). Hier beschreibt die violette Kurve den Verlauf der Austrittstemperatur unter Verwendung des „Reglers Ziel Regelgüte“ so-

wie die blaue Kurve den Verlauf der Austrittstemperatur unter Verwendung des Referenzreglers. Durch die Anpassungen der Regelparameter innerhalb der jeweiligen Klassen ist der optimierte Regler in der Lage, die Austrittstemperatur über den gesamten Verlauf stabil zu halten. Zwar weicht diese noch zu einigen Zeitpunkten, wie zum Beispiel 12:15 Uhr, deutlich von der Führungsgröße ab, jedoch neigt die Temperatur zu wesentlich weniger Schwingungen als bei der Referenzregelung. In Bezug auf die Regelabweichung hilft ein erneuter Vergleich des MQF der Austrittstemperatur. So weist die Austrittstemperatur im Falle der Referenzregelung einen MQF von $3,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Dieser konnte durch die klassenspezifische Regelung durch den „Regler Ziel Regelgüte“ auf $1,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ verringert werden. Der Regler führt dementsprechend zu einer signifikanten Steigerung in Bezug auf die Regelgüte.

Vergleich: Regler mit dem Ziel Fokussierung

Neben einer optimalen Sollwertfolge ist für einen effizienten Betrieb eines Kraftwerks eine hohe Fokussierungsrate von großer Bedeutung. Da beim „Regler Ziel Regelgüte“ während der Klassen „Kleine Schatten“, „Große Schatten“ sowie während einer hohen zeitlichen Variabilität ein Großteil der Regelung über die Stellgröße Fokussierung geregelt wird, ist diese nicht über den gesamten Zeitverlauf maximal. Aus diesem Grund wurde durch eine identische Vorgehensweise eine zweite Regelungsstrategie entworfen, die jedoch das Ziel einer hohen Fokussierungsrate verfolgt. Die Regelparameter, die innerhalb der unterschiedlichen Klassen beim Einsatz des „Reglers Ziel Fokussierung“ Verwendung finden, sind in Tabelle A.3 im Anhang zusammengefasst. Allgemein verwendet der Regler sowohl für den Fokussierungsregler als auch für den Pumpregler ein konservativeres Verhalten während eines räumlich variablen DNI. Abbildung 4.10 stellt den Verlauf der Austrittstemperatur aus

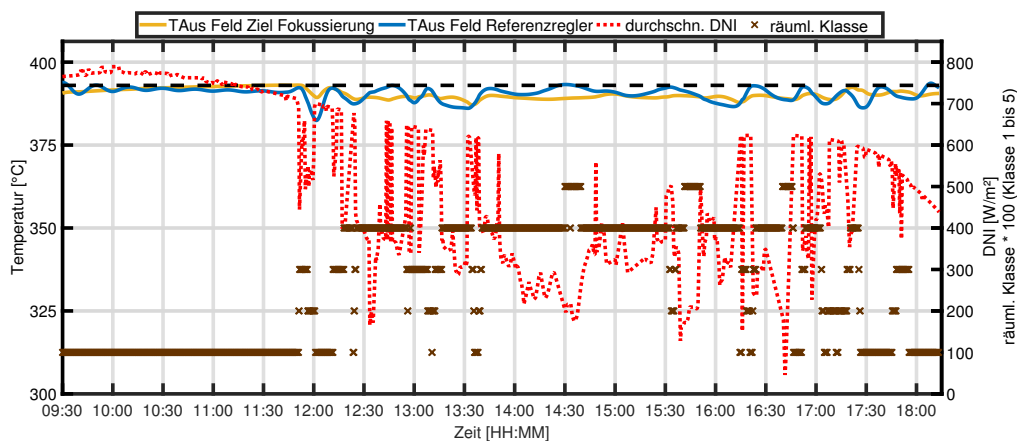


Abbildung 4.10.: Vergleich der Austrittstemperatur unter Verwendung des Referenzreglers und des optimierten klassenspezifischen Reglers mit dem Ziel einer hohen Fokussierung.

dem Solarfeld für den „Regler Ziel Fokussierung“ mit der gelben sowie für den Referenzregler mit der blauen Kurve dar. Zu Beginn, also während der Klasse Eins des räumlichen Verfahrens, ist der „Regler Ziel Regelgüte“ in der Lage, die Regelabweichung zu minimieren. Innerhalb dieser Klasse verwenden beide optimierten

Regler eine identische Regelstrategie. Sobald die Variabilität jedoch zunimmt, kann der optimierte Regler aufgrund des konservativen Verhaltens die Austrittstemperatur des Solarfelds nicht mehr auf der gewünschten Temperatur halten, sodass die Regelabweichung über den restlichen Verlauf des Tags vergleichsweise hoch ist. Bemerkenswert ist jedoch, dass diese noch immer geringer als die des Referenzreglers ist. Eine Berechnung des MQF zeigt, dass im Falle des 9. September 2015 durch Verwendung des „Reglers Ziel Fokussierung“ der MQF von $3,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $2,95\text{ }^{\circ}\text{C}$ gesunken ist. Zwar ist dies kein wesentlicher Unterschied, dennoch erzielt die Regelung in Bezug auf die Schwingung des Temperaturverlaufs ähnlich gute Ergebnisse wie der „Regler Ziel Regelgüte“. Das Hauptziel, das der Regler verfolgt, wurde durch eine Steigerung der Fokussierungsrate erreicht. Statt einer Fokussierungsrate von 99,16 % erreicht der optimierte Regler über den gesamten Tag eine mittlere Fokussierung von 99,85 %.

4.4. Bewertung der entworfenen Regler

Für eine Bewertung der Verwendbarkeit von Strahlungskarten ist ein ausführlicher Vergleich der vier entworfenen Regler notwendig. Deshalb werden die Regler, also der Referenzregler, der adaptive Regler, der die Strahlungskarte verwendet, der „Regler Ziel Regelgüte“ und der „Regler Ziel Fokussierung“ in sechs Kategorien untersucht, die einen umfassenden Eindruck über die Effizienz der Regler vermitteln. Eine Verbesserung gegenüber dem Referenzregler, der seine Informationen über den DNI lediglich aus den zwei Pyrheliometerstationen bezieht, ist letztendlich auf die Verwendung der Strahlungskarten zurückzuführen. Die Ergebnisse des Vergleichs beziehen sich dabei auf die Auswertung aller Kategorien auf Basis der verfügbaren 30 Tage. Die für die Regelung eines Parabolrinnenkraftwerks wesentlichen Kategorien, in denen die Regler verglichen werden, sind:

- **Notfalldéfokussierung:**

Die Notfalldéfokussierung beschreibt den Prozess, der notwendig ist, um die Wärmeträgerflüssigkeit vor Überhitzung zu schützen. Dementsprechend ist jeder notwendige Notfalldéfokussierungsprozess ein Anzeichen für das Versagen der Regelung, da diese nicht in der Lage war, auf die vorherrschende Störung entsprechend zu reagieren.

Die Belastung, die aufgrund dieses Prozesses auf die Drehgelenke² des Parabolrinnen-Kollektors entsteht, reduziert die Lebensdauer des Gelenks, sodass mit einer hohen Anzahl an Notfalldéfokussierungen erhöhte Kosten in der Wartung des Kollektors einhergehen. Neben der Belastung für den Kollektor indiziert diese Kategorie ebenfalls, wie oft das Fluid die Maximaltemperatur erreicht. So ist neben den Degradierungseffekten des Kollektors auch auf Seiten des Fluids mit beschleunigter Degradierung aufgrund von zunehmendem Cracking und steigenden Wasserstoff zu rechnen [31]. Durch die entstehende Instabilität des Fluids bei Überhitzung kommt es zu Schwingungen der Molekülketten, sodass diese letztlich brechen. Die Folge ist eine Beeinträchtigung der Fluideigenschaften, die der Pumpe und den Rohrleitungen

²Verbindung zwischen Feldverrohrung und Kollektor.

durch sinkende Viskosität über längere Zeit schaden. Ebenso steigt die Wasserstofffreigabe, die zu einer Erhöhung der thermischen Verluste sowie der Korrosionseffekte führt [32,33]. Zudem wird die Haupteigenschaft der Wärmeträgerflüssigkeit, also das Speichern von thermischer Energie, aufgrund einer Veränderung der Wärmekapazität des Fluids langfristig beeinträchtigt.

• Schwingung der Temperatur:

Eine unerwünschte Eigenschaft, die mit der Charakteristik eines PT-2 Verhaltens einhergeht ist die Schwingungstendenz der Ausgangsgröße des Systems, also der Austrittstemperatur. Schwankungen der Temperatur führen zu einer zunehmenden Belastung der Kraftwerkskomponenten, sodass diese beschleunigten Degradierungseffekten unterliegen [32]. Die Folge sind steigende Kosten des Kraftwerkbetriebs, da die Lebensdauer der Komponenten deutlich von der erwarteten abweicht.

Tabelle 4.2.: Ermittelte durchschnittliche Anzahl an Schwingungen pro Tag über unterschiedliche Schwellenwerte

Schwellenwert	Durchschn. Anzahl an Schwingungen pro Tag			
	Referenzregler	adaptiver Regler	Regler Ziel Fokussierung	Regler Ziel Regelgüte
1 °C	19,73	18,80	14,03	13,60
2 °C	15,97	14,87	11,50	10,63
3 °C	12,90	12,13	9,57	8,67
4 °C	10,03	9,90	8,17	6,87
5 °C	8,97	7,97	7,07	6,00

Um einen Vergleich der Schwingungstendenz der Austrittstemperatur bei Verwendung der Regler zu ermöglichen, werden die resultierenden Verläufe der Austrittstemperaturen aller 30 Tage ausgewertet. Dabei wird eine Schwingung anhand eines lokalen Maxima oder Minima im Verlauf der Austrittstemperatur identifiziert. Jedoch muss diese einen festgelegten Schwellenwert überschreiten, damit das zu diesem Zeitpunkt erkannte Maxima bzw. Minima als Schwingung gewertet wird. Folglich beschreibt der Schwellenwert die Mindestamplitude, die die Schwingung aufweisen muss, um während der Auswertung berücksichtigt zu werden. Tabelle 4.2 bildet die Ergebnisse dieser Untersuchung für fünf unterschiedliche Schwellenwerte ab. Es ist auffallend, dass im Verlauf der Austrittstemperatur im Falle des „Reglers Ziel Fokussierung“ und vor allem des „Reglers Ziel Regelgüte“ weniger Schwingungen auftreten. Besonders bei einem niedrigen Schwellenwert von 1 °C liegt zwischen dem Referenzregler und dem „Regler Ziel Regelgüte“ mit durchschnittlich sechs Schwingungen pro Tag ein deutlicher Unterschied vor. Der Unterschied nimmt jedoch mit steigendem Grenzwert ab, sodass im Falle einer notwendigen Amplitude von 5 °C dieser nur noch bei circa drei Schwingungen liegt. Hervorzuheben ist dabei, dass ein Grenzwert von 5 °C ein lokales Maxima bzw. lokales Minima von 398 °C bzw. 388 °C voraussetzt, sodass selbst eine geringe Reduzierung der Anzahl an Schwingungen

bei diesem Schwellenwert einen enormen Unterschied für Belastung der Kraftwerkskomponenten bedeutet. Obwohl die quantitative Reduktion der Schwingungen über den Schwellenwert variiert, ist eine nahezu identische prozentuale Verbesserung von circa 32 % über alle Schwellenwerte zu verzeichnen.

• **Regelabweichung:**

In der Regelungstechnik ist die Aufgabe des Reglers, die Regelabweichung stets minimal zu halten, sodass die Regelgröße der Führungsgröße optimal folgt. Ein Vergleich der Regler innerhalb dieser Kategorie ist entsprechend sinnvoll. Jedoch bedeutet eine Verbesserung der Regelabweichung durch die Verwendung eines Reglers nicht, dass dieser auch zu einem höheren Ertrag führt (Abschnitt 2.2.1). Vielmehr beschreibt diese Kategorie, wie gut der Regler die Austrittstemperatur des Solarfelds über die gesamten 30 Tage, also auch während vorübergehender Wolkenzüge, stabilisieren kann, ohne von der Solltemperatur abzuweichen. Somit signalisiert eine Verbesserung innerhalb dieser Kategorie eine stabilere und konstantere Austrittstemperatur.

• **Ertrag:**

Der vom Parabolrinnenkraftwerk für den simulierten Tag generierte Ertrag wird gemäß [22] über den am Wärmetauscher resultierenden Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{tauscher}}$ zwischen Wärmeträgerflüssigkeit und Prozessdampf berechnet. Dieser führt über Gleichung 4.7 zur theoretischen Leistung des Parabolrinnenkraftwerks.

$$P_{th} = \int \dot{Q}_{\text{tauscher}} dt \quad (4.7)$$

Zeitgleich werden entstehende Verluste am Powerblock p_{PB} sowie thermische Verluste p_{TS} bei der Ertragsrechnung berücksichtigt. Die Leistungsverluste am Powerblock berücksichtigen die Beeinflussung seines Wirkungsgrads aufgrund einer vom Sollwert abweichenden Austrittstemperatur des Fluids aus dem Solarfeld (Abbildung 4.11). Die thermischen Verluste beschreiben die Leistungsverluste, die entstehen, wenn der thermische Wärmespeicher durch eine geringere Fluidtemperatur erwärmt wird als prinzipiell möglich, sodass in der Folge weniger thermische Energie gespeichert wird [22]. Dementsprechend berücksichtigt die Ertragsrechnung eine Abweichung von der Führungsgröße, was besonders dem „Regler Ziel Regelgüte“ zugute kommt. Letztlich lassen sich die Erträge des simulierten Tags E_T über die Gleichung 4.8 bestimmen.

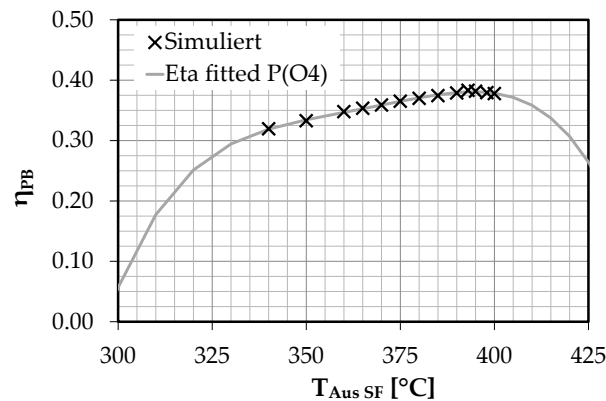
$$E_T = p_{B,J} \cdot LCoE \cdot P_{th} - \left(\int p_{PB} + p_{TS} dt \right) \quad (4.8)$$

Hier beschreibt $p_{B,J}$ den Wirkungsgrad des Powerblocks, der durchschnittlich über ein Jahr vorherrscht, sowie $LCoE^3$ die Stromgestehungskosten, die sich über das Jahresmittel ergeben. Eine Berechnung der Stromentstehungskosten sowie des durchschnittlichen Powerblock-Wirkungsgrads für das Parabolrinnenkraftwerk La Africana mittels des vom DLR entwickelten Greenius Simulation Tool ergab, dass die

³Levelized Cost of Electricity

Kosten 19,25 Euro Ct/kWh betragen und der Powerblock einen Wirkungsgrad von 25 % aufweist [34].

Der vom Parabolrinnenkraftwerk erwirtschaftete Ertrag beschreibt die direkten Einnahmen des Kraftwerks und stellt aus finanzieller Sicht die wichtigste Kategorie für den Vergleich der Regler dar. Dadurch, dass sich die verwendete Ertragsrechnung nicht nur auf den entstehenden Wärmestrom stützt, sondern zusätzlich die Verluste aufgrund einer abweichenden Austrittstemperatur berücksichtigt, liefert sie eine realistische Abschätzung.



Quelle: [22]

Abbildung 4.11.: Veränderung des Powerblock-Wirkungsgrads in Abhängigkeit der Austrittstemperatur des Solarfelds.

• Wärmestrom:

Neben der Berechnung des Ertrags ist der Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{tauscher}}$ ein weiterer Wert, der einen Vergleich der Effizienz des Reglers zulässt. Beide geben Aufschluss über den direkten Ertrag, der an diesem Tag generiert wird. Jedoch lässt der Wärmestrom nur einen Eindruck ohne die Berücksichtigung von Verlusten zu, sodass die Notwendigkeit einer hohen Regelgüte weniger Einfluss nimmt.

• Fokussierung:

Die Fokussierung beschreibt, wieviel von der theoretisch möglichen Solarenergie in Form von G_{eff} während des Tags genutzt wird. Folglich lässt auch diese Kategorie eine Interpretation in Erträgen zu, wobei zeitgleich ein Eindruck über die verlorenen Erträge aufgrund von nicht vollständiger Fokussierung entsteht.

Die Ergebnisse der Auswertung aller 30 Tage bildet das Netzdiagramm in Abbildung 4.12 ab. In diesem beschreiben die sechs Achsen für jede Kategorie die jeweilige Verbesserung gegenüber der Referenzregelung in Prozent. Dabei beschreiben Verbesserungen in den Kategorien auf der linken Seite geringere Belastungen der Prozesskomponenten und damit zeitgleich eine indirekte Ertragssteigerung. Hingegen haben Verbesserungen in den Kategorien auf der rechten Seite Auswirkungen auf die direkte Ertragssteigerung. Innerhalb des Netzdiagramms repräsentieren die vier unterschiedlich gefärbten Linien das Verhalten der jeweiligen Regler in den einzelnen

Kategorien. Da das Diagramm die Verbesserungen im Vergleich zur Referenzregelung (blaue Linie) in Prozent angibt, befindet sich diese im Zentrum der Abbildung und weist selbst eine Verbesserung von 0 % über alle Kategorien auf. Das Verhalten der adaptiven Regelung, die den durchschnittlichen DNI über die Strahlungskarte auswertet und verwendet, ist über die orange Linie visualisiert. Der „Regler Ziel Fokussierung“ wird über die gelbe Linie, sowie der „Regler Ziel Regelgüte“ über die violette Linie abgebildet. Die prozentuale Verbesserung in den Kategorien Ertrag, Wärmestrom und Fokus ist aufgrund von geringen Unterschieden am rechten Rand der Abbildung vergrößert dargestellt.

Beginnend mit der Kategorie „Verringerung Notfalldefokussierung“, in der die deutlichste Steigerung zu verzeichnen ist, erreicht der „Regler Ziel Fokussierung“ eine Verbesserung von 36,34 %. Hingegen reduziert der „Regler Ziel Regelgüte“ die auftretenden Notfalldefokussierungen um 25,58 %. In beiden Fällen liegt eine enorme Reduzierung der Anzahl an Notfalldefokussierungen vor, jedoch erreicht der „Regler Ziel Fokussierung“ eine wesentlich höhere Verbesserung, da dieser durch eine konstante Unterschreitung der Solltemperatur, wie es Abbildung 4.10 darstellt, permanent einen höheren Temperaturanstieg benötigt, bis die Temperatur, bei der die Notfalldefokussierung eingreift, auftritt. Hervorzuheben ist ebenfalls die Verbesserung durch den adaptiven Regler mit Karte, denn dieser erreicht eine Verringerung der Notfalldefokussierung von 12,82 % aufgrund der Tatsache, dass der durchschnittliche DNI über die Strahlungskarte ermittelt wird. In der Kategorie „Schwingung der Temperatur“ führt der „Regler Ziel Regelgüte“ zu den besten Ergebnissen, wie es zuvor bereits anhand von Tabelle 4.2 aufgezeigt wurde. Die Ergebnisse, die auf

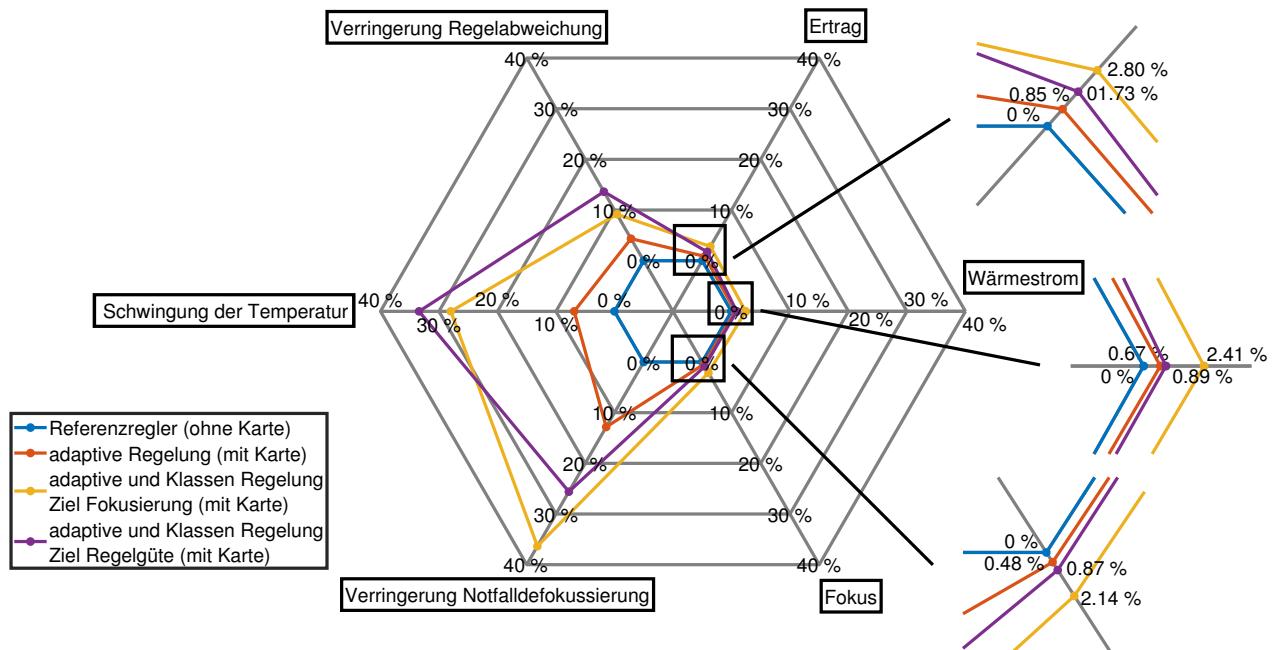


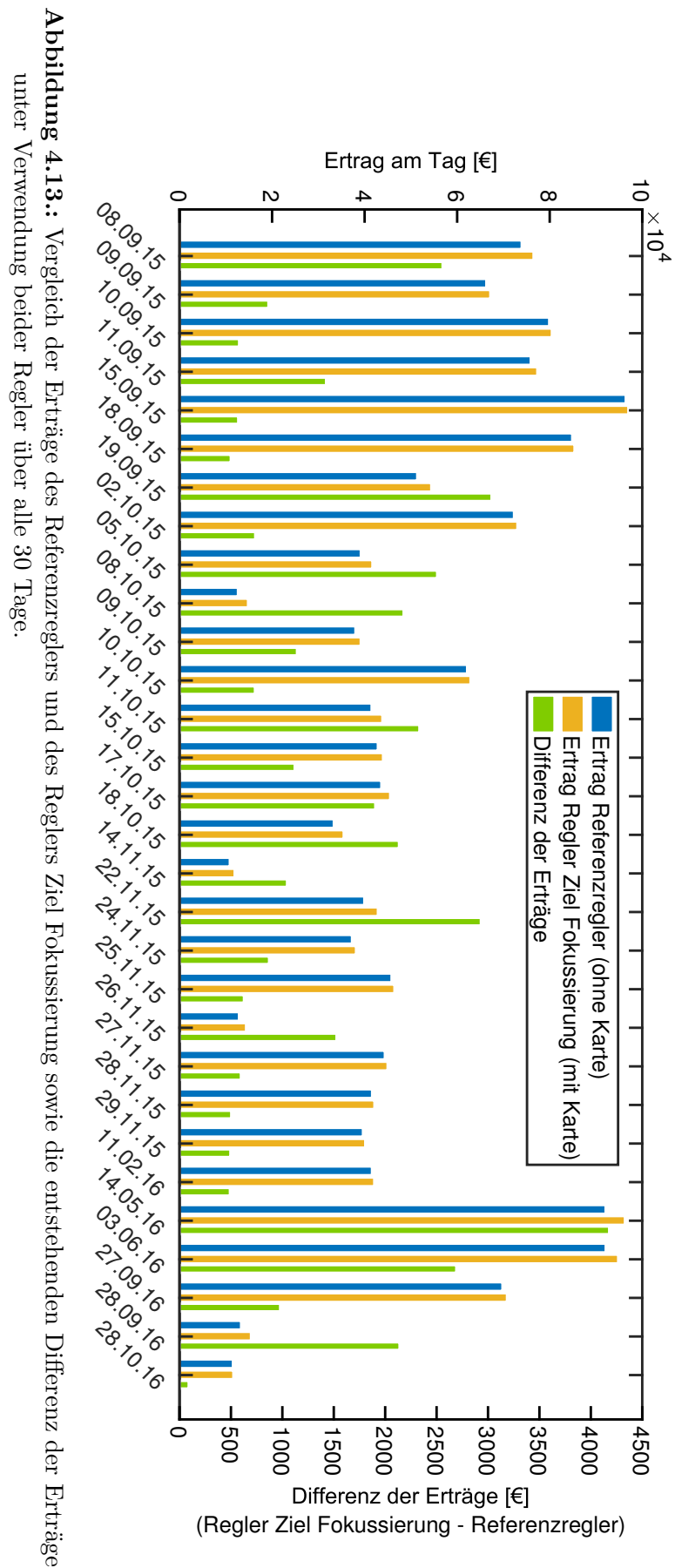
Abbildung 4.12.: Vergleich des Verhaltens der Regler innerhalb der für das Parabolrinnenkraftwerk wesentlichen Kategorien.

dieser Achse aufgetragen sind, beziehen sich dabei auf einen festgelegten Schwellwerts von 2°C . Auch der „Regler Ziel Fokussierung“ erreicht mit 27,98 % signifikante Verbesserungen. Ein ähnliches Resultat entsteht bei der Kategorie „Verringerung Regelabweichung“. Im Sinne der Reglerauslegung führt auch hier die Verwendung des „Reglers Ziel Regelgüte“ mit einer Verringerung der Regelabweichung um 13.61 % zu dem besten Ergebnis.

In den drei Kategorien, die eine direkte Ertragssteigerung beschreiben, also Fokus, Wärmestrom und Ertrag, weist der „Regler Ziel Fokussierung“ die signifikantesten Steigerungen auf. Hervorzuheben ist zudem vor allem der Unterschied der Kategorien Ertrag und Wärmestrom. So ist der Wärmestrom im Falle des „Reglers Ziel Regelgüte“ nur geringfügig höher als im Falle des adaptiven Reglers, aber der Ertrag aufgrund der Berücksichtigung der Regelabweichung in der Ertragsrechnung letztendlich wesentlich höher. Jedoch ist der Faktor der Regelabweichung nicht gewichtig genug, um einen höheren Ertrag als den des „Reglers Ziel Fokussierung“ zu erreichen, da der Unterschied im Wärmestrom grundsätzlich zu groß ist. Im Bezug auf die Fokussierung erreicht der „Regler Ziel Fokussierung“ ebenfalls die signifikanteste Verbesserung.

Insgesamt ist festzuhalten, dass jeder Regler, der die Strahlungskarte verwendet, in allen Kategorien zu einer Verbesserung gegenüber des Referenzreglers führt. Welcher der beiden Regler, die das Klassifizierungsverfahren verwenden, letztendlich den besten darstellt, ist nicht offensichtlich, da die indirekten Ertragssteigerungen nur schwer abschätzbar sind. Eine Beschränkung der berücksichtigten Erträge auf die direkten würde jedoch definitiv zur Verwendung des „Reglers Ziel Fokussierung“ führen. Eine Ergänzung der Ergebnisse, wie sie das Netzdiagramm darstellt, liefert Abbildung 4.13, in der die Erträge jedes simulierten Tags sowohl für den Referenzregler als auch für den „Regler Ziel Fokussierung“ aufgetragen sind. Hier repräsentiert der blau gefärbte Balken den Ertrag des Referenzreglers und der gelb gefärbte Balken den des „Reglers Ziel Fokussierung“. Zusätzlich beschreibt der grüne Balken die Differenz der Erträge über die rechte Ordinate. Wichtig ist dabei, dass der optimierte Regler an jedem Tag den Ertrag erhöht und die Ergebnisse aus dem Netzdiagramm nicht aufgrund eines sehr dominanten Tags entstehen.

Der Einfluss von Strahlungskarten auf die Regelung wird vor allem anhand eines Vergleichs der Tage 15.09.15 sowie 14.05.16 deutlich, da an beiden Tagen ähnlich hohe Erträge erzielt werden, aber der „Regler Ziel Fokussierung“ am 14.05.16 zu einer deutlichen Ertragssteigerung gegenüber der Referenzregelung führt. Dabei stellt der 15.09.15 einen Tag dar, an dem überwiegend Clearsky Bedingungen vorherrschen, wohingegen sich der Verlauf des DNI am 14.05.16 durch eine häufige Beeinflussung durch Wolkenzüge auszeichnet. Durch die Anpassungen, die die Regelung aufgrund der vorliegenden Informationen der Strahlungskarte erfahren hat, ist diese in der Lage, an einem Tag mit einer gewissen Variabilität des DNI einen deutlichen Anstieg im Ertrag zu verzeichnen. So entsteht eine Steigerung der Erträge von circa 4000 € für den 14.05.16. Gleichzeitig können die Erträge für den 15.09.15 nur geringfügig um 500 € gesteigert werden. Dies bedeutet, dass der optimierte Regler im Falle eines Tags, der keine Störungen aufweist, nur zu einem minimalen Unterschied in den direkten Erträgen führt.



Teil III.

Schluss

Zusammenfassung

Eine Reduktion des Einflusses von Wolkenzügen auf den Ertrag und die Stabilität des Parabolrinnenkraftwerks wurde, gemäß der aufgezeigten Resultate, die aufgrund der Strahlungskarte ermöglicht wurden, der Motivation entsprechend erfolgreich umgesetzt.

Dieses Ziel wurde durch die Entwicklung eines Verfahrens zur Klassifizierung der Strahlungskarten sowie eines weiteren Klassifizierungsverfahrens, das der Literatur entnommen wurde, erreicht. Dieser Schritt war notwendig, um die Informationen über den orts aufgelösten DNI, den die Strahlungskarte abbildet, für die Regelung verwertbar zu machen. Eine anschließende Untersuchung des Verhaltens innerhalb der eingeführten Klassen mittels der Simulationsumgebung VSF führte zu der Optimierung der Regelung. Dabei wurde zu Beginn lediglich der durchschnittliche DNI über die Strahlungskarte ausgewertet, um die adaptive Regelung des Referenzreglers zu erweitern. Anschließend wurden anhand der Erkenntnisse aus dem Datensatz von 30 unterschiedlichen Tagen zwei verschiedene Regelstrategien entwickelt. So ist das Ziel des ersten Reglers, die Regelabweichung möglichst gering zu halten, um dadurch eine hohe Regelgüte zu verzeichnen. Der zweite Regler unterliegt einer höheren Regelabweichung, erzielt dabei jedoch eine höhere Fokussierungsrate. Die entwickelten Regler verwenden allesamt Informationen der Strahlungskarte und erzielen aufgrund dieser Informationen signifikante Erfolge.

Die Information der orts aufgelösten Strahlung ermöglichte es, die in Abschnitt 2.2.3 formulierten Optimierungspunkte vollständig zu erfüllen. So weist die Austrittstemperatur nach Optimierung der Regelung ein wesentlich stabileres Verhalten auf als zuvor. Dies äußert sich zum einen in einer Abnahme der Schwingungstendenz (Verbesserung: 32 %), zum anderen in einer geringeren Regelabweichung (Verbesserung: 13,61 %). Des Weiteren konnte die Anzahl an Notfalldefokussierungen (Verbesserung: 12,82 %) deutlich reduziert werden, was bedeutet, dass das Fluid seltener

kritische Temperaturen erreicht. All diese Verbesserungen wirken sich mit einer geringeren Belastung auf die Komponenten aus und führen langfristig zu einer Ertragssteigerung.

Gleichzeitig resultierte der Einsatz der Strahlungskarten in einer Erhöhung des Wärmestroms (Verbesserung: 2,41 %), sodass die Turbine durch den heißeren Prozessdampf mehr Leistung erzielt, was letztlich wiederum eine Steigerung des Ertrags bedeutet (Verbesserung: 2,80 %). Neben einer Erhöhung des Wärmestroms bewirkte der Einsatz der Strahlungskarten ebenfalls eine höhere mittlere Fokussierung (Verbesserung: 2,14 %), wodurch die Verluste an Solarenergie geringer sind, als es zuvor der Fall war.

All dies führt zu einer Ertragssteigerung, die letztendlich über eine realistische Ertragsrechnung ermittelt wurde. Insgesamt konnte anhand des Datensatzes von 30 wechselhaften Tagen gezeigt werden, dass die entworfenen Regler unabhängig von der Störung besser agieren als zuvor. Dementsprechend lässt sich der Einsatz von Strahlungskarten im Zusammenhang mit der Regelung eines Parabolrinnenkraftwerks als definitiv sinnvoll bewerten.

KAPITEL 6

Ausblick

Die innerhalb der Arbeit vorgestellten Ergebnisse führen zu einer positiven Bewertung der Strahlungskarten, wobei die Ergebnisse der Annahme unterliegen, dass die Strahlungskarten vollständig der Realität entsprechen. Da dies jedoch, wie in der Validierung der Strahlungskarten in Abschnitt 1.3 aufgezeigt wurde, nicht der Fall ist, entsteht weiterer Forschungsbedarf auf diesem Gebiet. Dementsprechend ist es notwendig, eine Unsicherheitsanalyse durchzuführen, die den Einfluss einer fehlerhaften Information der Strahlungskarte auf die Regelung des Parabolrinnenkraftwerks prüft. So ist eine Abschätzung der Auswirkung von Strahlungskarten, die dem derzeitigen Stand des Nowcasting-Systems entsprechen, möglich.

Des Weiteren beruft sich die Auswertung der Strahlungskarten innerhalb dieser Arbeit lediglich auf die Strahlungskarten, die den aktuellen ($t = 0$ min) orts aufgelösten DNI darstellen, jedoch stellt das Nowcasting-System weitere Strahlungskarten mit einer Vorlaufzeit von bis zu 15 Minuten zur Verfügung. Dieses Potential ist bisher vollständig unerforscht, sodass durch die Strahlungskarten noch weitere Verbesserungen im Einsatz der Regelung möglich sind. Ein sinnvoller Einsatz der Vorlaufzeiten wäre eine modellprädiktive Regelung. So können die zu jedem Zeitpunkt verfügbaren 16 Strahlungskarten, also $t = 0$ min bis $t = 15$ min, in VSF simuliert werden, sodass der Verlauf der Austrittstemperatur über die nächsten 15 Minuten näherungsweise bekannt ist und die optimale Regelung anhand dieser Information eingeleitet werden kann. Dies würde ebenfalls dazu führen, dass die verbleibende Totzeit zwischen Veränderung des Pumpdrucks und Einflussnahme auf die resultierende Fluidtemperatur in den Loops irrelevant wäre, da der Pumpdruck präemptiv auf die bevorstehende Störung angepasst wird.

Ein weiterer interessanter Aspekt wäre der Einsatz einer orts aufgelösten Regelung. Es wurde bereits zu Beginn von Kapitel 3 angedeutet, was dies für die Verwendbarkeit der Strahlungskarten bedeutet. Denn die eigentliche Information, die die

Strahlungskarte enthält, nämlich welcher Loop zu welcher Zeit welche Strahlung erfährt, ist im Zusammenhang mit dem derzeitigen Stand der Regelung nicht berücksichtigbar. Zwar wäre eine orts aufgelöste Regelung über eine Beeinflussung des Massenstroms durch die an jedem Loop befindlichen Ventile theoretisch möglich, jedoch würde dies mit einer hohen Komplexität einhergehen, da eine Veränderung eines Druckventils einen Einfluss auf alle Loops nehmen würde. So besteht auch hier ein hoher Forschungsbedarf.

Insgesamt bieten die Strahlungskarten noch großes Potential, sodass durch weitere Untersuchungen der Einsatz von Strahlungskarten in der Regelung eines Parabolrinnenkraftwerks zu bedeutenden Verbesserungen führen kann.

A.1. Verluste des Parabolrinnenkraftwerks

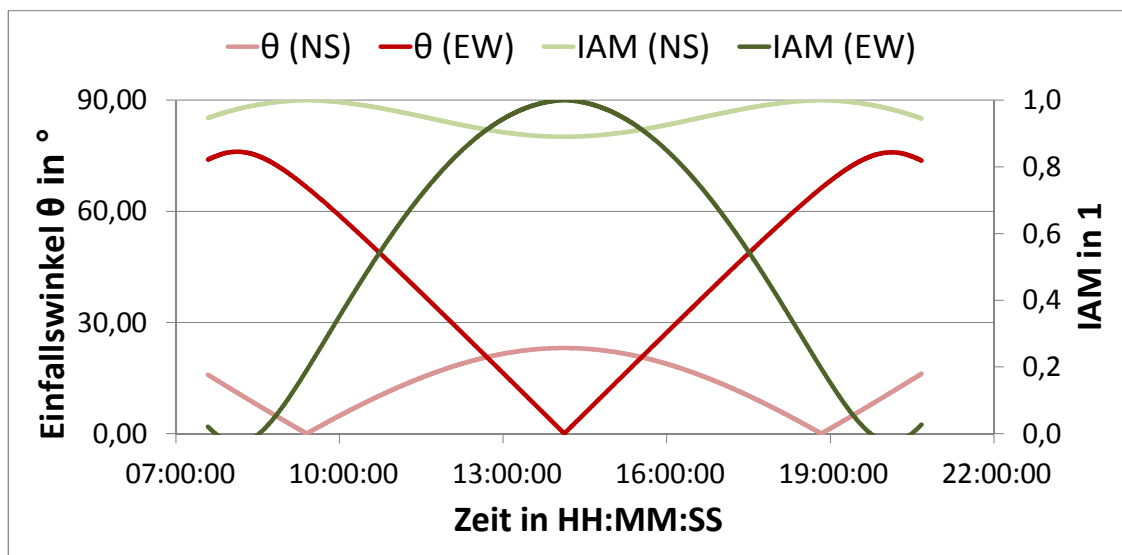
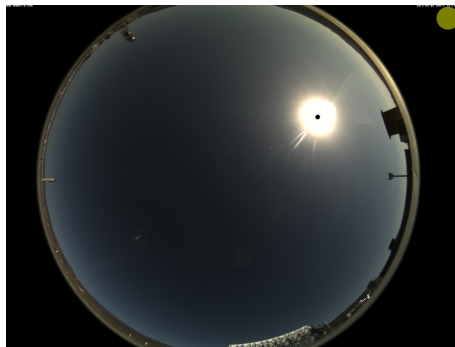
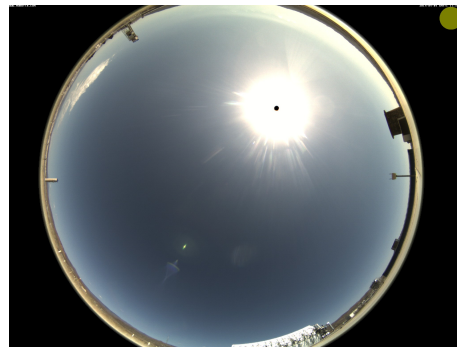


Abbildung A.1.: Tagesverlauf des Winkelkorrekturfaktors (IAM). OW = Ost-West-Ausrichtung der Kollektoren. NS = Nord-West-Ausrichtung der Kollektoren. Die relevante Kurve ist die grüne, da innerhalb dieser Arbeit die betrachteten Kollektoren den Sonnenverlauf von Norden nach Süden verfolgen.

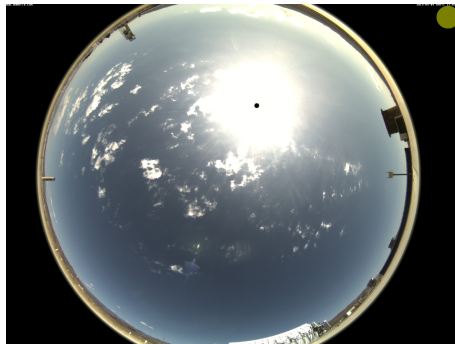
A.2. Herausforderung der Regelung



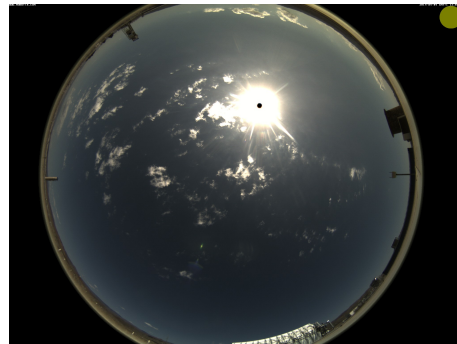
(a) Clearsky - kurz nach Sonnenaufgang.



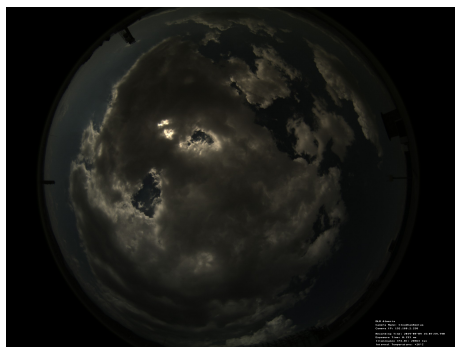
(b) Clearsky - kurz von Mittag.



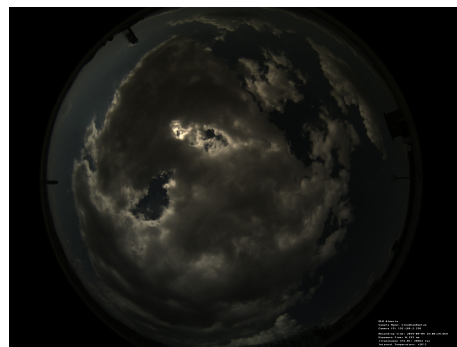
(c) zeitliche Variabilität - kleine Wolken reduzieren die Strahlung nicht.



(d) zeitliche Variabilität - Strahlung wird von kleinen Wolken wiederholt reduziert.



(e) Overcast - Dicke Wolken reduzieren die Strahlung massiv



(f) Overcast - Dicke Wolken reduzieren die Strahlung massiv

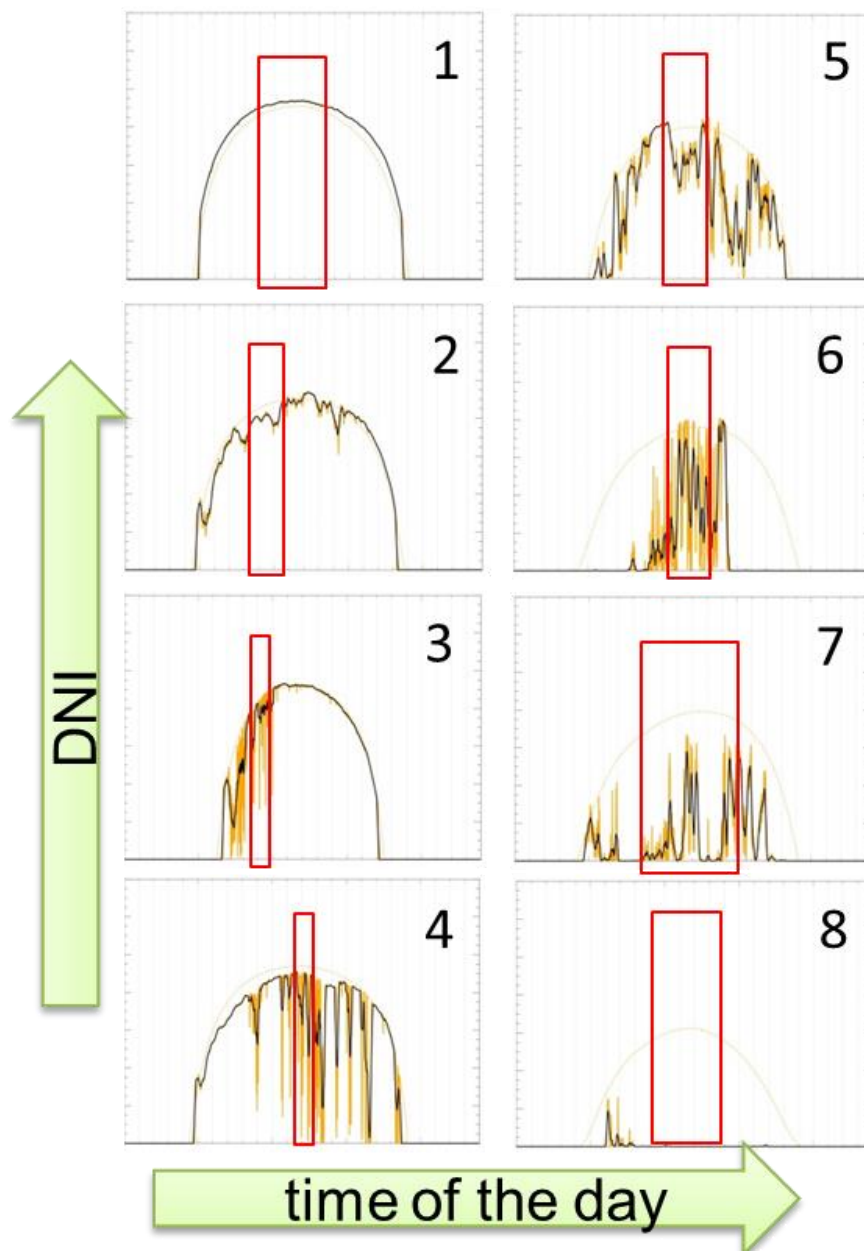
Abbildung A.2.: Darstellung der Kamerabilder des 9. September 2015.

A.3. Klassifizierung

A.3.1. Klassifizierung der zeitlichen Variabilität

Tabelle A.1.: originale Grenzwerte des Klassifizierungsverfahren für zeitliche Variabilität entsprechend [28]

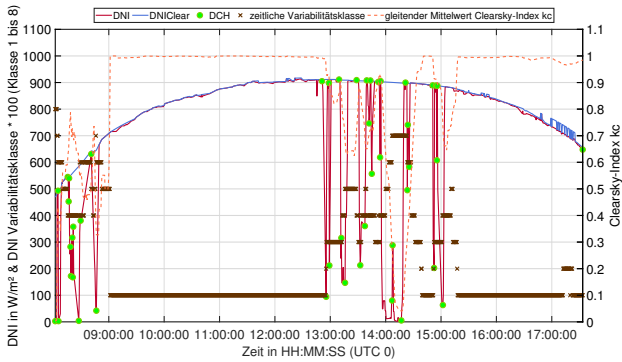
Klasse	Clearsky-Index k_c	Anz. an Richtungswechsel DCH
1	0.99	0-2
2	0.95	0-7
3	0.92	0-18
4	0.71	6-33
5	0.66	0-13
6	0.41	6-22
7	0.18	0-20
8	0	0-2



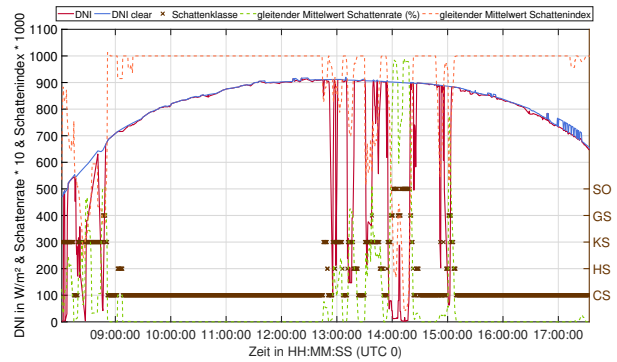
Quelle: [?]

Abbildung A.3.: Darstellung der Acht Klassen, die die zeitliche Variabilität des DNI beschreiben. Hier zeigt die schwarze Linie, den Verlauf des DNI. Das rote Viereck begrenzt den untersuchten Zeitbereich (hier: eine Stunde).

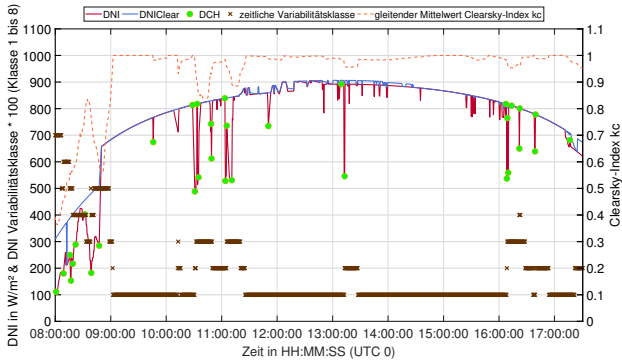
A.3.2. Klassifizierung aller 30 Versuchstage



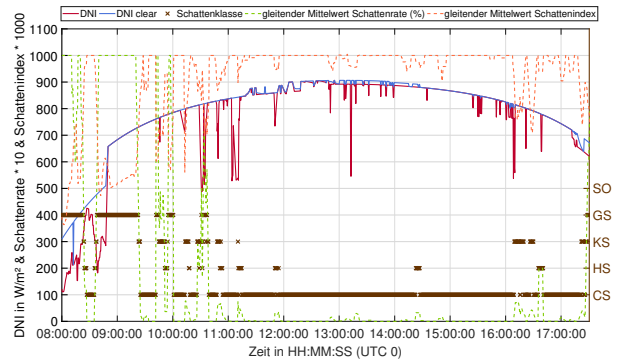
(a) 08.09.15 zeitlich



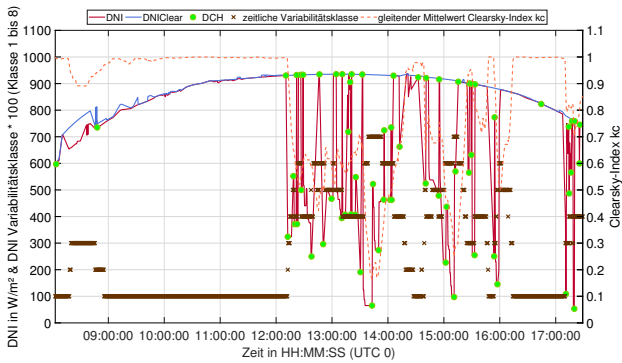
(b) 08.09.15 räumlich



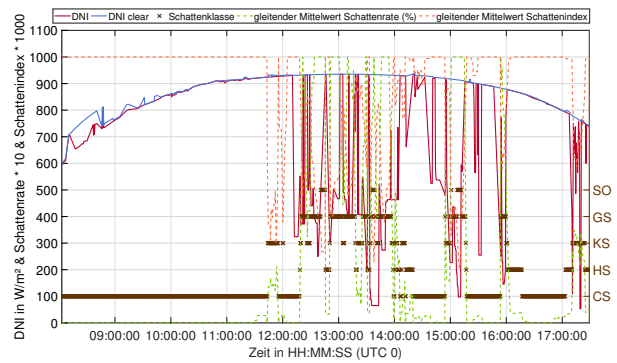
(c) 10.09.15 zeitlich



(d) 10.09.15 räumlich

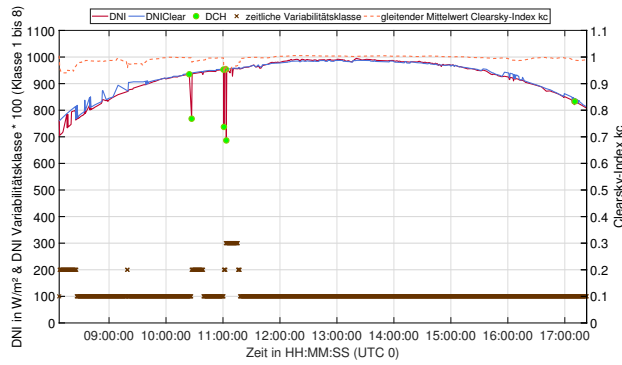


(e) 11.09.15 zeitlich

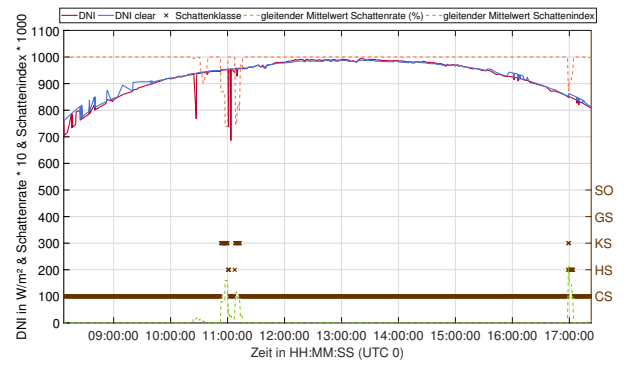


(f) 11.09.15 räumlich

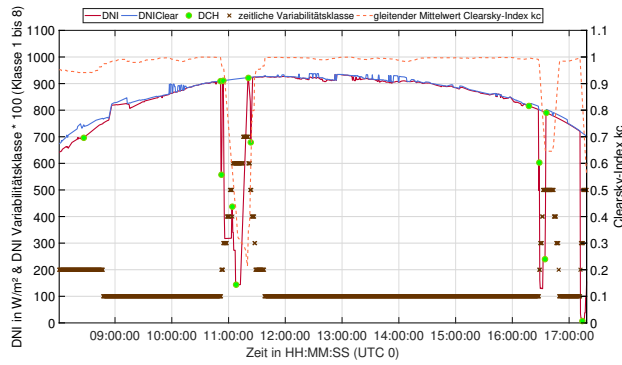
Abbildung A.4.: zeitliche und räumliche Klassifizierung.



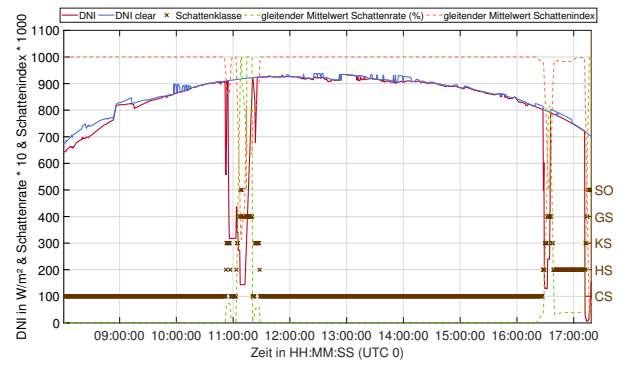
(a) 15.09.15 zeitlich



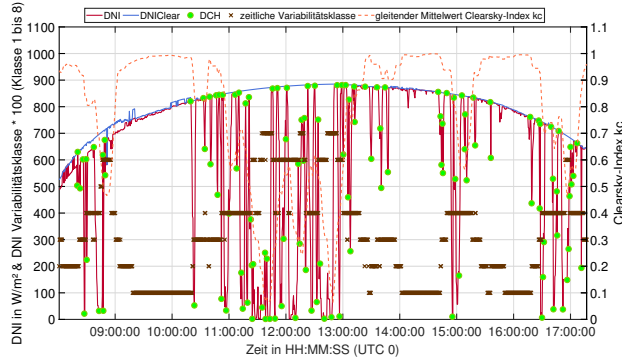
(b) 15.09.15 räumlich



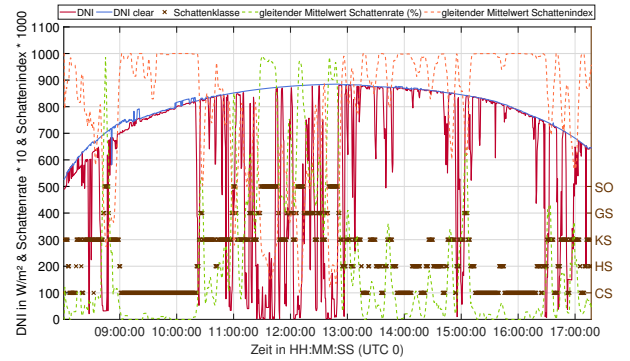
(c) 18.09.15 zeitlich



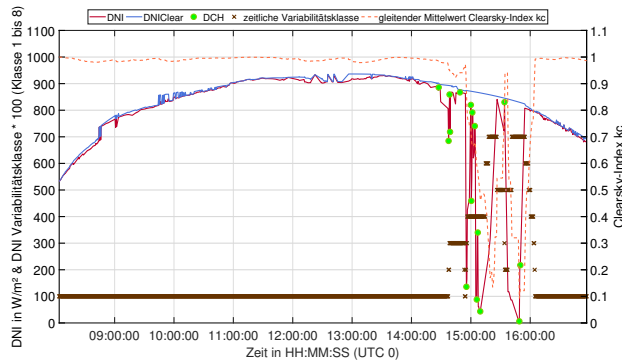
(d) 18.09.15 räumlich



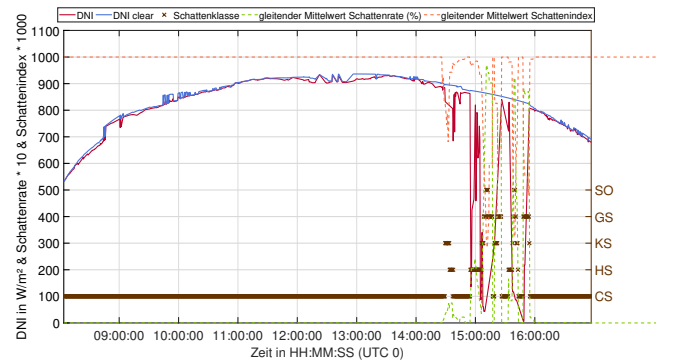
(e) 19.09.15 zeitlich



(f) 19.09.15 räumlich

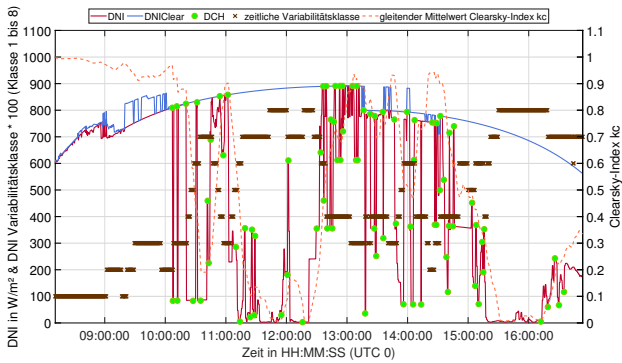


(g) 02.10.15 zeitlich

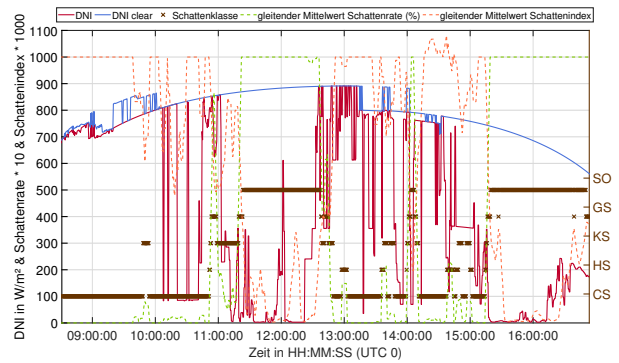


(h) 02.10.15 räumlich

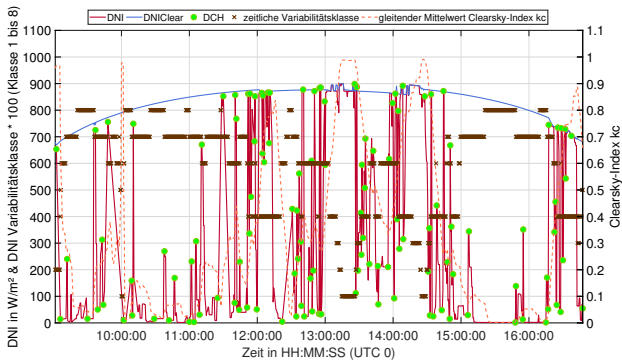
Abbildung A.5.: zeitliche und räumliche Klassifizierung.



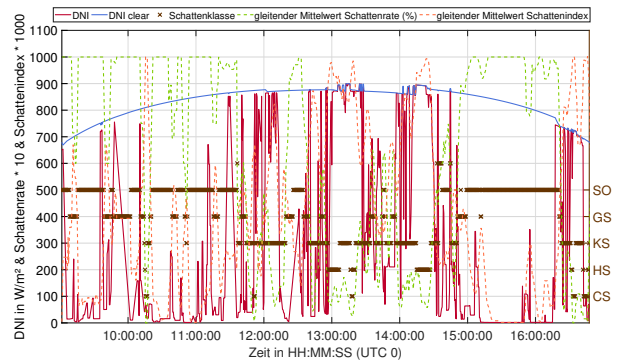
(a) 04.10.15 zeitlich



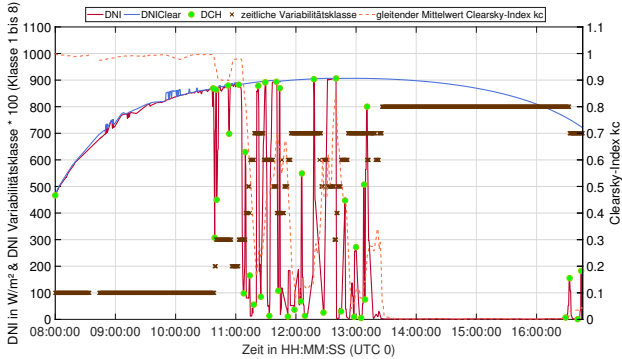
(b) 04.10.15 räumlich



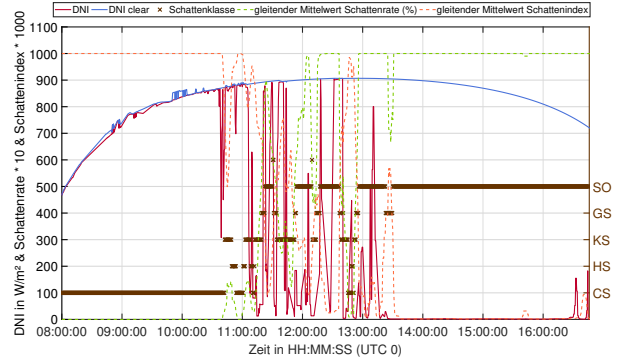
(c) 08.10.15 zeitlich



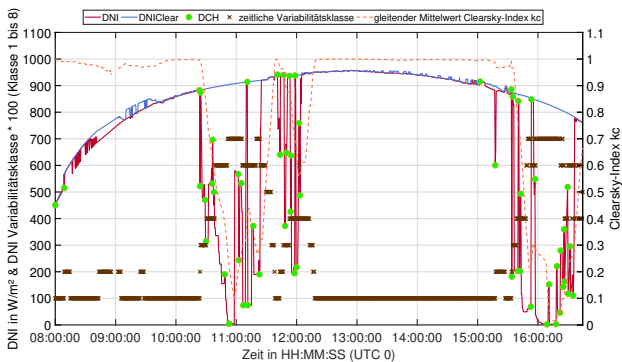
(d) 08.10.15 räumlich



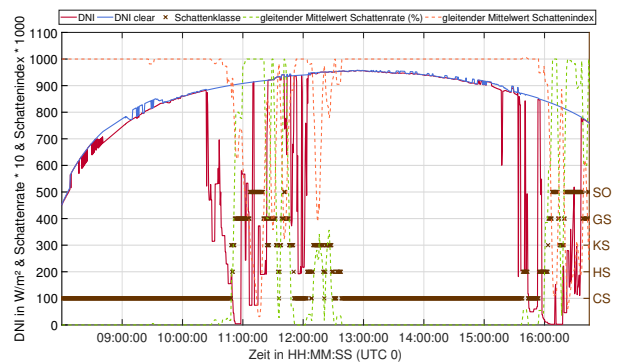
(e) 09.10.15 zeitlich



(f) 09.10.15 räumlich

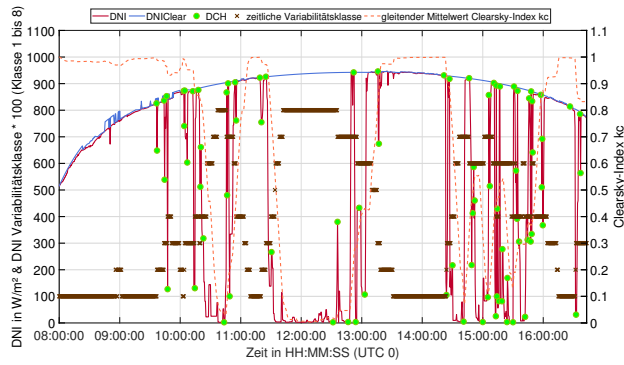


(g) 10.10.15 zeitlich

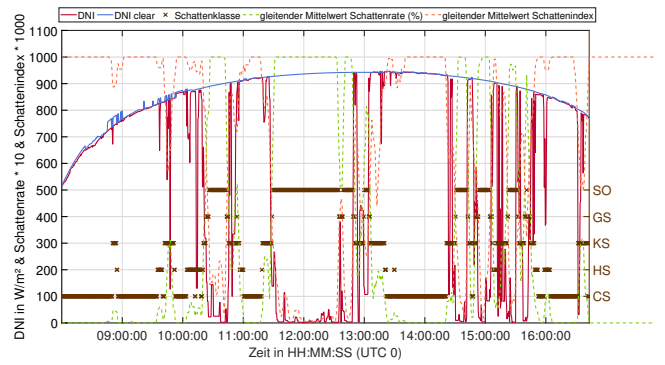


(h) 10.10.15 räumlich

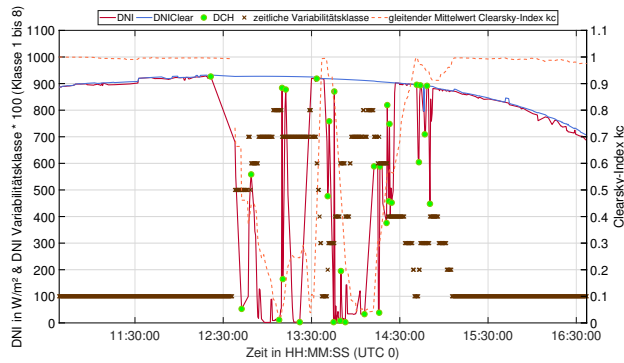
Abbildung A.6.: zeitliche und räumliche Klassifizierung.



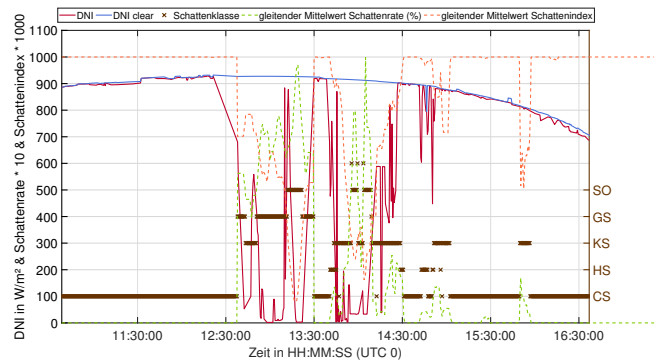
(a) 11.10.15 zeitlich



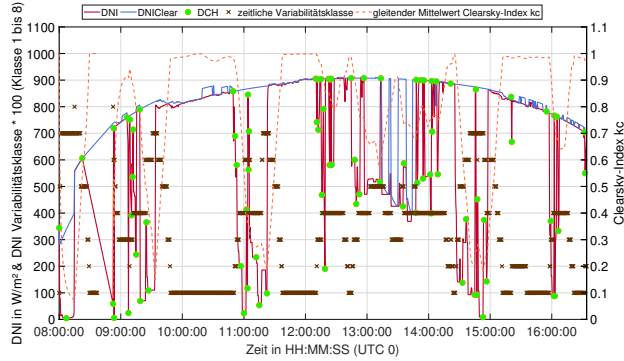
(b) 11.10.15 räumlich



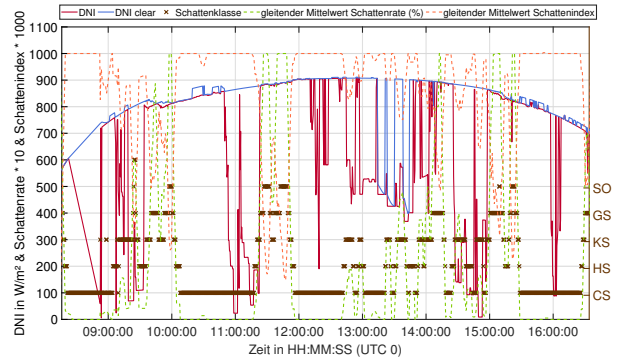
(c) 15.10.15 zeitlich



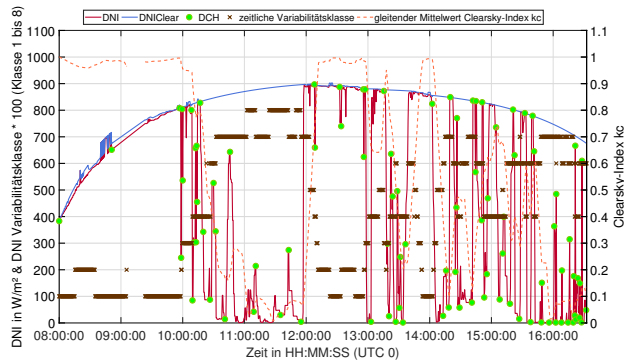
(d) 15.10.15 räumlich



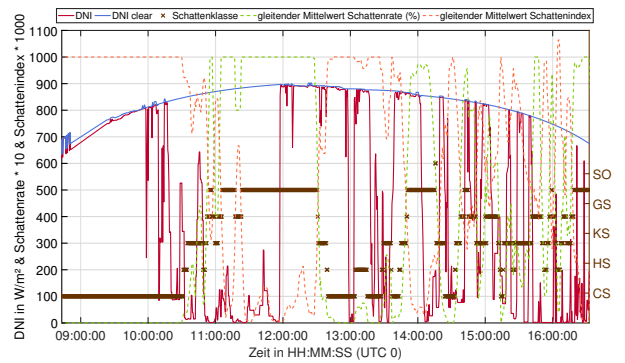
(e) 17.10.15 zeitlich



(f) 17.10.15 räumlich

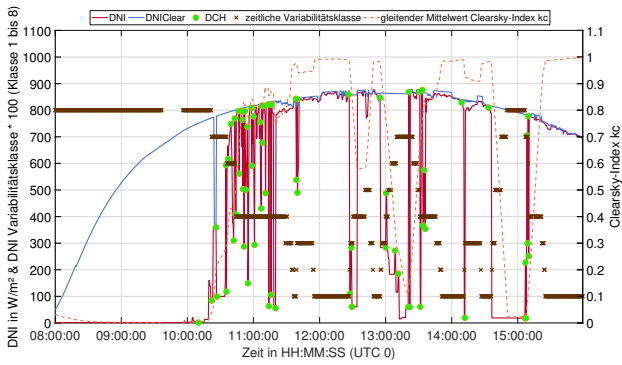


(g) 18.10.15 zeitlich

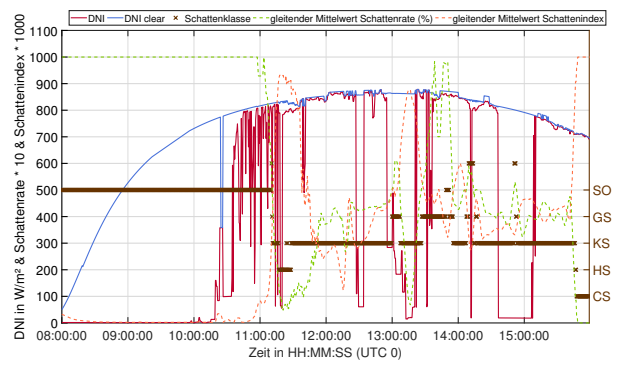


(h) 18.10.15 räumlich

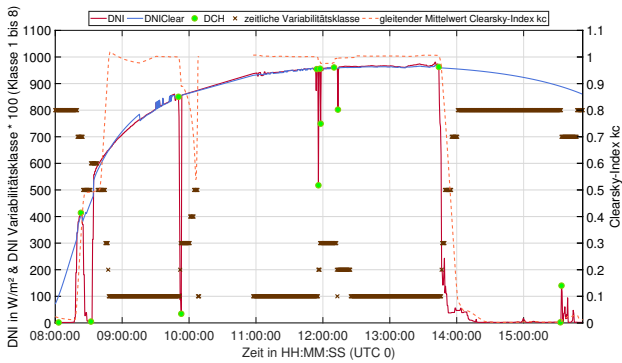
Abbildung A.7.: zeitliche und räumliche Klassifizierung.



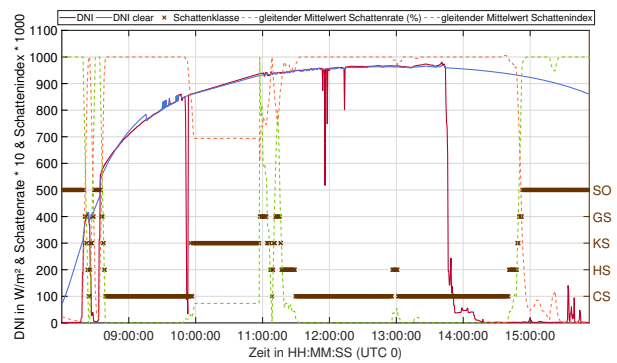
(a) 14.11.15 zeitlich



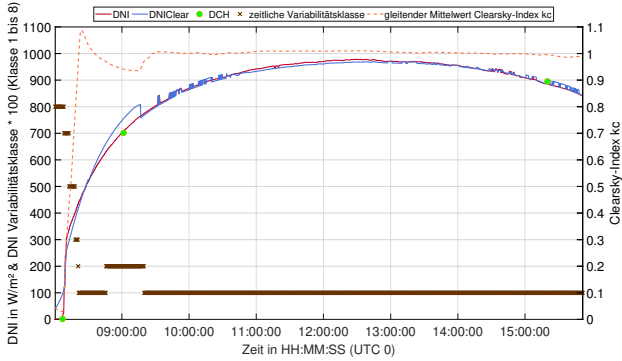
(b) 14.11.15 räumlich



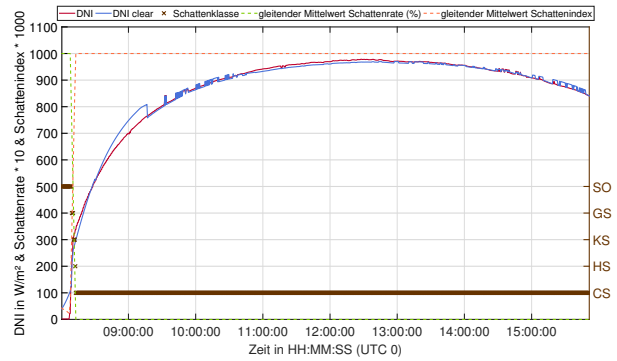
(c) 22.11.15 zeitlich



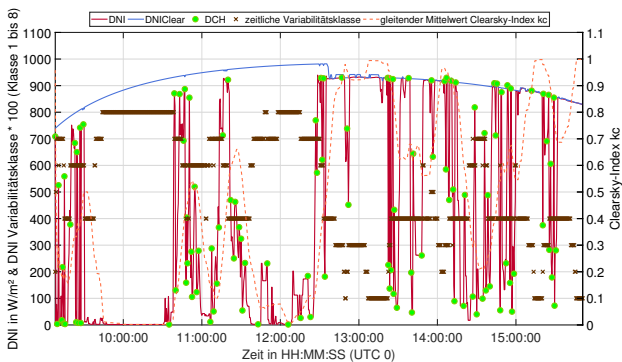
(d) 22.11.15 räumlich



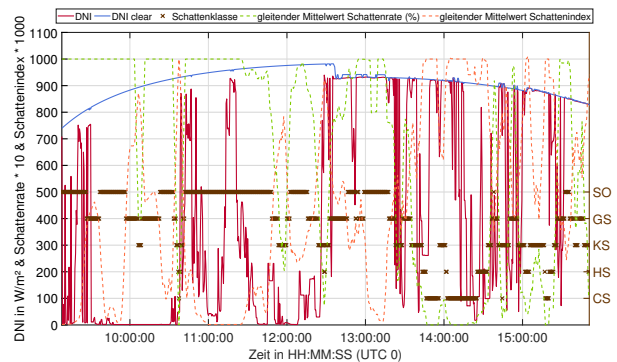
(e) 24.11.15 zeitlich



(f) 24.11.15 räumlich

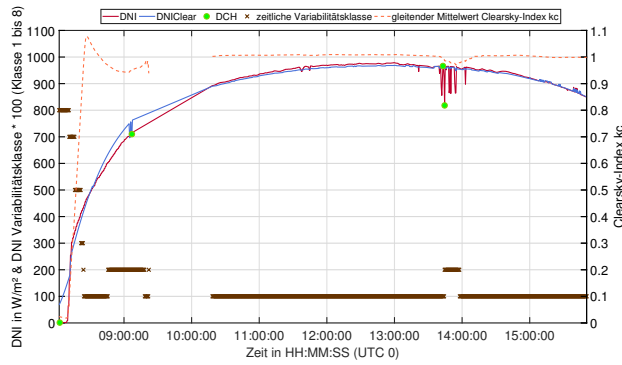


(g) 25.11.15 zeitlich

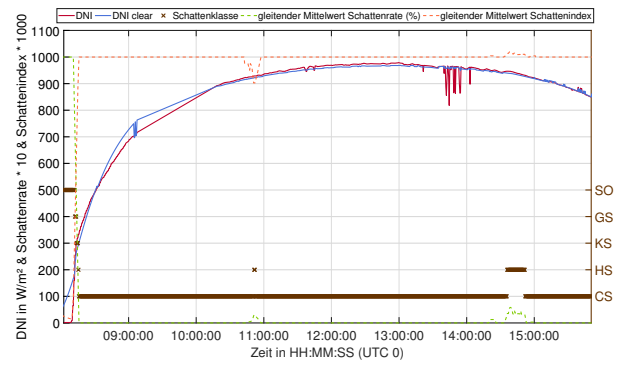


(h) 25.11.15 räumlich

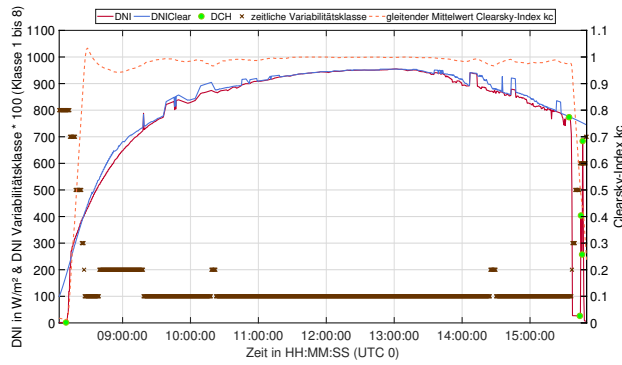
Abbildung A.8.: zeitliche und räumliche Klassifizierung.



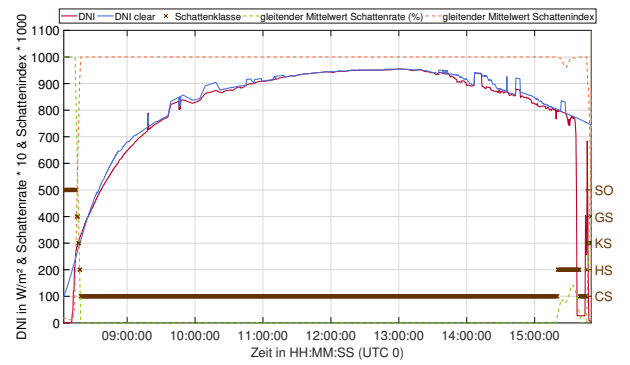
(a) 26.11.15 zeitlich



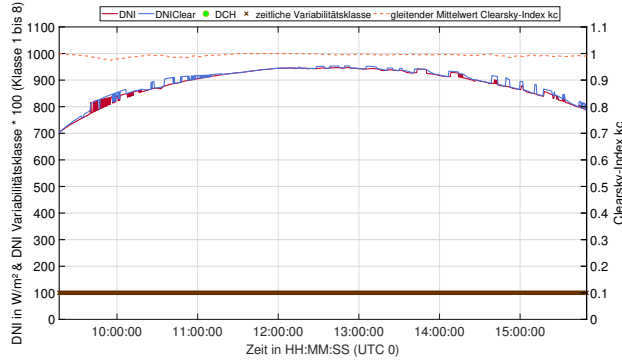
(b) 26.11.15 räumlich



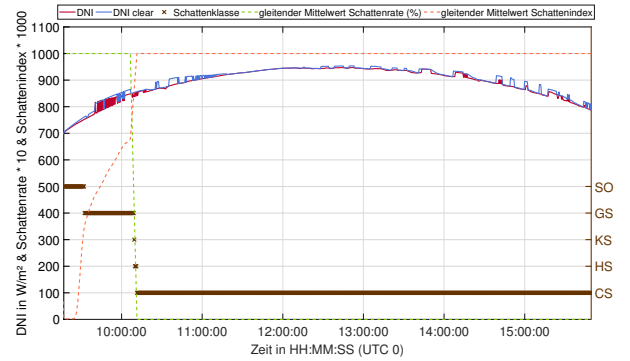
(c) 27.11.15 zeitlich



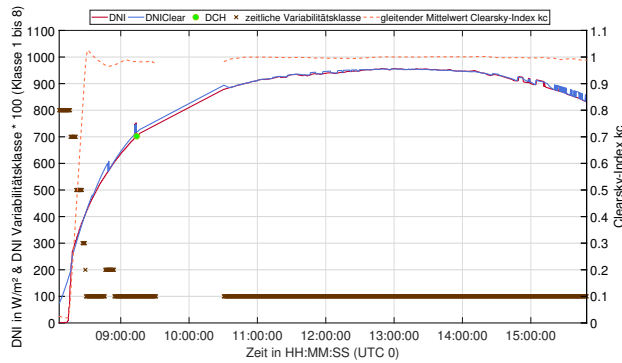
(d) 27.11.15 räumlich



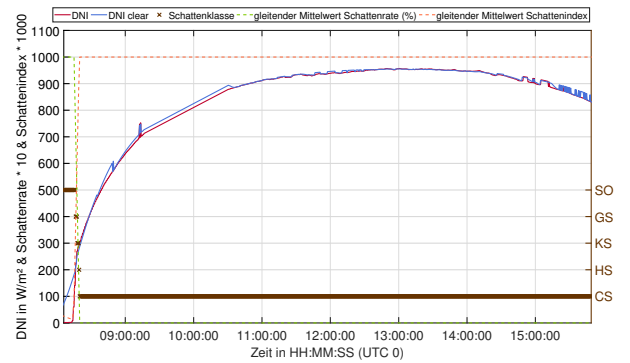
(e) 28.11.15 zeitlich



(f) 28.11.15 räumlich

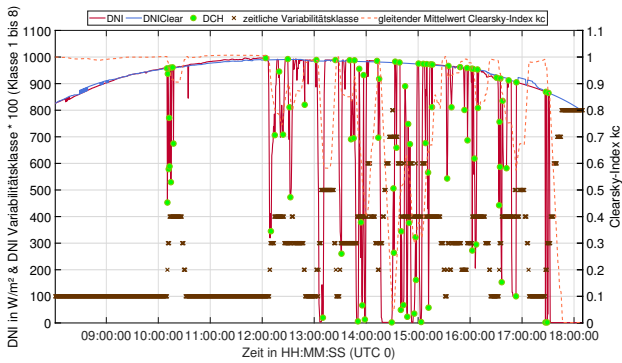


(g) 29.11.15 zeitlich

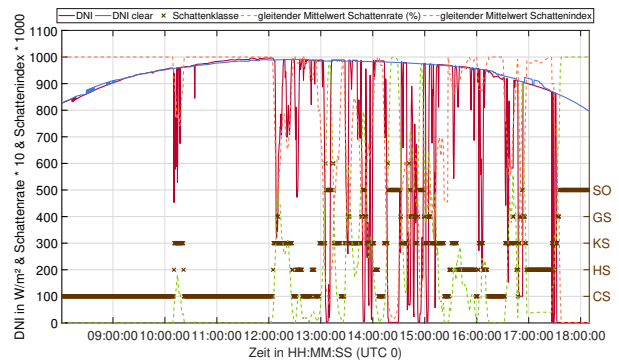


(h) 29.11.15 räumlich

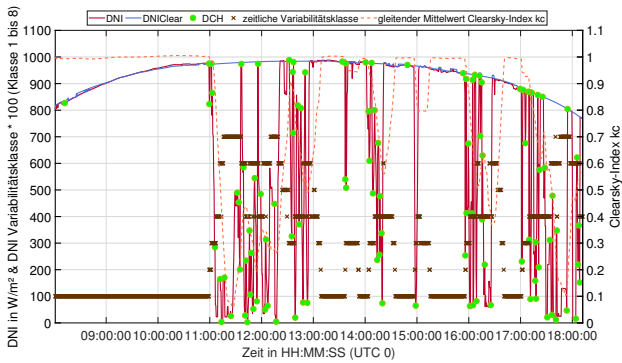
Abbildung A.9.: zeitliche und räumliche Klassifizierung.



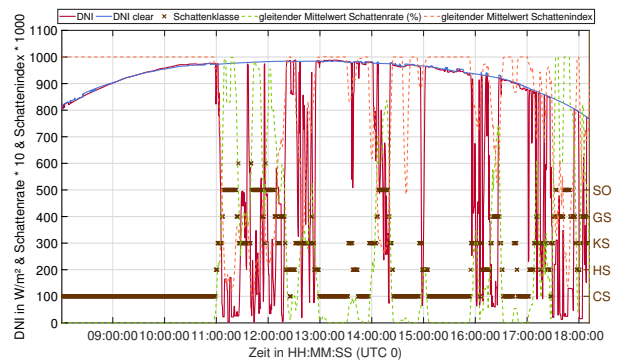
(a) 11.05.16 zeitlich



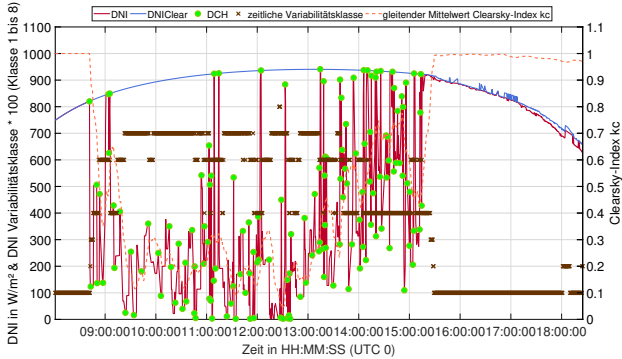
(b) 11.05.16 räumlich



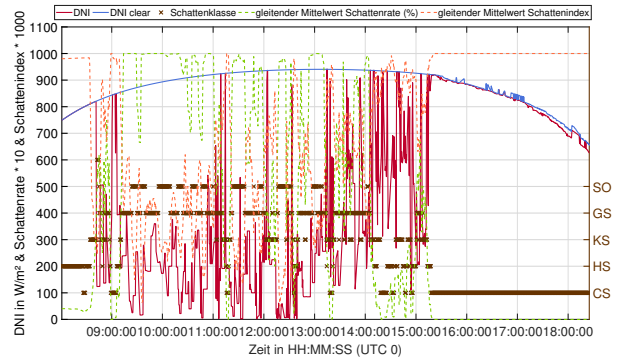
(c) 14.05.16 zeitlich



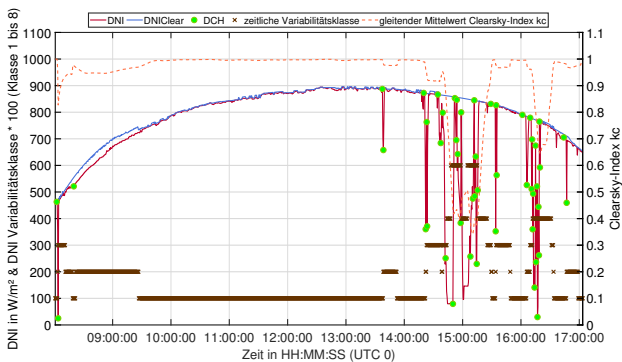
(d) 14.05.16 räumlich



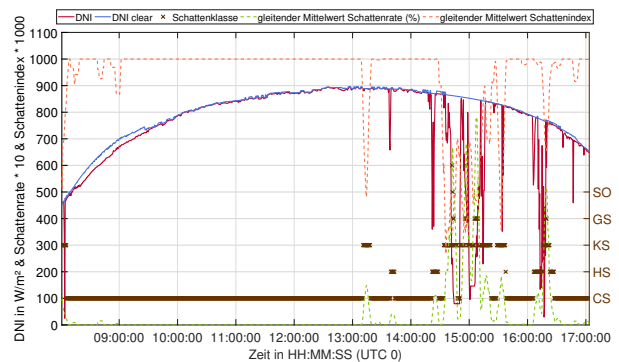
(e) 03.06.16 zeitlich



(f) 03.06.16 räumlich

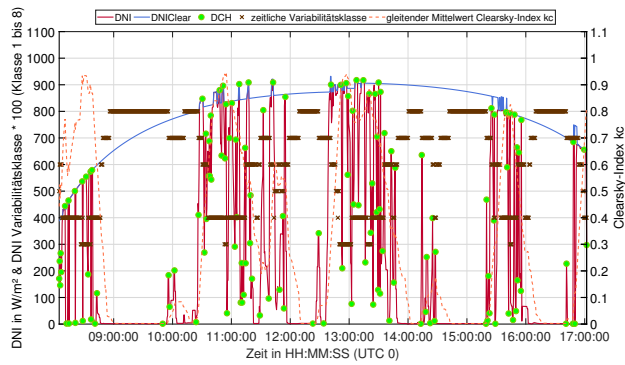


(g) 27.09.16 zeitlich

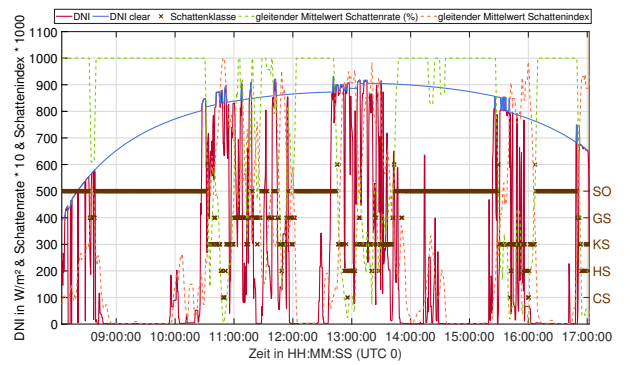


(h) 27.09.16 räumlich

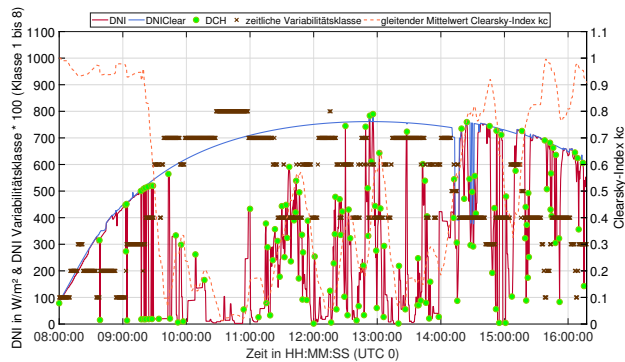
Abbildung A.10.: zeitliche und räumliche Klassifizierung.



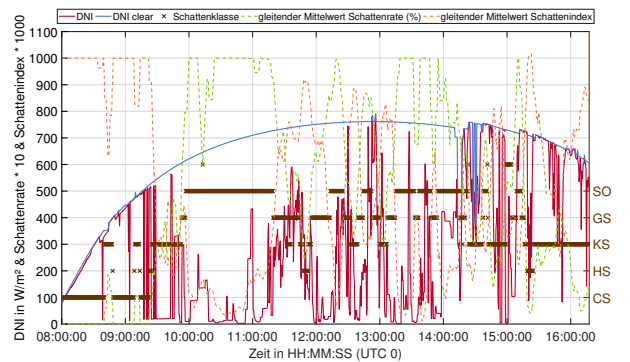
(a) 28.09.16 zeitlich



(b) 28.09.16 räumlich



(c) 28.10.16 zeitlich



(d) 28.10.16 räumlich

Abbildung A.11.: zeitliche und räumliche Klassifizierung.

A.4. Optimierung der Regelung

A.4.1. Regelparameter Ziel Regelgüte

Tabelle A.2.: Regelparameter des Reglers Ziel Regelgüte

	adaptiver Pumpregler			FB Loop			Fokusregler		
Klasse	K_p	T_p	T_c	K_p	T_p	T_c	K_p	T_p	T_c
1	adaptiv	adaptiv	moderat	3	160	sehr aggressiv	-2	50	moderat
2	"	"	aggressiv	"	"	aggressiv	"	"	moderat
3.1	"	"	moderat			deaktiviert	"	"	aggressiv
3.2	"	"	aggressiv			deaktiviert	"	"	aggressiv
4.1	"	"	moderat			deaktiviert	"	"	aggressiv
4.2	"	"	aggressiv			deaktiviert	"	"	aggressiv
4.3	"	"	aggressiv			deaktiviert	"	"	aggressiv
5	"	"	aggressiv			deaktiviert	"	"	moderat

A.4.2. Regelparameter Ziel Fokussierung

Tabelle A.3.: Regelparameter des Reglers Ziel Fokussierung

	adaptiver Pumpregler			FB Loop			Fokusregler		
Klasse	K_p	T_p	T_c	K_p	T_p	T_c	K_p	T_p	T_c
1	adaptiv	adaptiv	moderat	3	160	sehr aggressiv	-6	115	moderat
2	"	"	aggressiv	"	"	aggressiv	"	"	moderat
3.1	"	"	konservativ			deaktiviert	"	"	moderat
3.2	"	"	aggressiv			deaktiviert	"	"	moderat
4.1	"	"	moderat	"	"	moderat	"	"	moderat
4.2	"	"	aggressiv			deaktiviert	"	"	moderat
4.3	"	"	aggressiv			deaktiviert	"	"	moderat
5	"	"	konservativ	"	"	moderat	"	"	moderat

Literaturverzeichnis

- [1] REN21 (2017): Renewables 2017 - Global Status Report. Technical Report, Online: URL: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf, Aufruf: 06.05.2018.
- [2] Solar Millennium (2011): Die Parabolrinnenkraftwerke Andasol 1 bis 3 - Premiere der Technologie in Europa. Online: URL: <http://large.stanford.edu/publications/coal/references/docs/Andasol1-3deutsch.pdf>, Aufruf: 06.04.2018.
- [3] Braun, B. (2010): Wirtschaftlichkeit solarthermischer Kraftwerke (CSP) am Beispiel Desertec-Projekt unter besonderer Berücksichtigung der Clean Development Mechanism (CDM). Hamburg: Diplomica Verlag GmbH.
- [4] SolarPACES (2017): Bokpoort Breaks A Solar Thermal Energy Production Record. Online: URL: <http://www.solarpaces.org/bokpoort-breaks-solar-thermal-energy-production-record/>, Aufruf: 06.04.2018.
- [5] Solargis (2018): Globalsolaratlas. Online: URL: <http://globalsolaratlas.info/>, Aufruf: 06.04.2018.
- [6] CSP World (2018): Csp World Map. Online: URL: <http://cspworld.org/cspworldmap>, Aufruf 06.04.2018.
- [7] Eck, M., Schenk, H. (2012): Yield Analysis for Parabolic Trough Solar Thermal Power Plants - a Basic Approach. Technical Report, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - enerMENA.
- [8] Wittmann, M., Müller-Elvers, C., Schenk, H. und Bruce, B. (2012): Optimization of Molten Salt Parabolic Trough Power Plants Using Different Salt Candidates. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Marrakesch, Marokko.
- [9] Jung, C., Dersch, J., Nietsch, A. und Senholdt, M. (2015): Technological Perspectives of Silicone Heat Transfer Fluids for Concentrated Solar Power. In: Energy Procedia, Heft 69, S. 663-671.

- [10] Falco, M. (o.J.): Parabolic Trough Power Plants. Online: URL: http://www.oil-gasportal.com/solar-power-concentration/?print=print#_ftnref1, Aufruf: 06.04.2018.
- [11] Günther, M. (2012): Parabolic Trough Technology - Advanced CSP Teaching Materials. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt - enerMena, Aachen.
- [12] Nrel (2013): Concentrating Solar Power Projects, Andasol. Online: URL: https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=117, Aufruf: 06.04.2018.
- [13] Janotte, N. (2012): Requirements for Representative Acceptance Tests for the Prediction of the Annual Yield of Parabolic Trough Solar Fields. Diss., RWTH Aachen, Aachen.
- [14] Bachour, D. und Perez-Astudillo, D. (2016): DNI, GHI and DHI Ground Measurements in Doha, Qatar, 2014. Energy Procedia, Heft 49, S. 2398–2404.
- [15] Nouri, B., Kuhn, P., Wilbert S., Prah, C., Pitz-Paal, R., Blanc, P., Schmidt, T., Yasser, Z., Santigosa, L. R. und Heineman, D. (2017): Nowcasting of DNI Maps for The Solar Field Based On Voxel Carving And Individual 3D Cloud Objects From All Sky Images. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Santiago de Chile, Chile.
- [16] Wilbert, S., Nouri, B., Prah, C., Garcia, G., Ramirez, L., Zarzalejo, L.F., Valenzuela, R., Ferrera, F., Kozonek, N. und Liria, J. (2016): Application of Whole Sky Imagers for Data Selection for Radiometer Calibration. EU PVSEC 2016 Proceedings, S. 1493–1498.
- [17] Ineichen, P. und Perez, R. (2002): A New Airmass Independent Formulation for The Linke Turbidity Coefficient. Solar Energy, Heft 73, S. 151–157.
- [18] Kuhn, P., Nouri, B., Wilbert, S., Prah, C., Kozonek, N., Schmidt, T., Yasser, Z., Ramirez, L., Zarzalejo, L., Meyer, A., Vuilleumier, L., Heinemann, D., Blanc, P., und Pitz-Paal, R. (2017): Validation of an all-sky imager based nowcasting system for industrial PV plants. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, S. 1-14.
- [19] Hirsch, T und Schenk, H. (2010): Dynamics of Oil-Based Parabolic Trough Plants - a Detailed Transient Simulation Model. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Perpignan, Frankreich.
- [20] Schenk, H., Dersch, J., Hirsch, T. und Polklas, T. (2015): Transient Simulation of The Power Block In a Parabolic Trough Power Plant. 11th International Modelica Conference, Versailles, Frankreich. S. 605–614.
- [21] Noureldin, K., Gonzalez-Escalada, L. M., Hirsch, T., Nouri, B., und Pitz-Paal, R. (2015): Modelling And Optimization of Transient Processes In Line Focusing Power Plants With Single-Phase Heat Transfer Medium. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Kapstadt, Südafrika.

-
- [22] Noureldin, K., Hirsch, T., Kuhn, P., Nouri, B., Yasser, Z. und Pitz-Paal, R. (2017): Modelling An Automatic Controller for Parabolic Trough Solar Fields Under Realistic Weather Conditions. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Santiago de Chile, Chile.
 - [23] Noureldin, K., Hirsch, T. und Pitz-Paal, R. (2016): Virtual Solar Field - An Opportunity To Optimize Transient Processes in Line-Focus CSP Power Plants. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Abu Dhabi, Vereinigten Arabischen Emirate.
 - [24] Noureldin, K., Hirsch, T. und Pitz-Paal, R. (2017): Virtual Solar Field - Validation of a Detailed Transient Simulation Tool for Line Focused Fields With Single Phase Heat Transfer Fluid. Solar Energy, Heft 146, S. 131–140.
 - [25] Noureldin, K. (2018): Modelling and Optimization of Transient Processes in Parabolic Trough Power Plants with Single-Phase Heat Transfer Fluid. Diss., RWTH Aachen, Aachen.
 - [26] Shinskey, F. (1996): Process Control Systems: Application, Design, and Tuning. Chemical engineering books, Miami: McGraw Hill Higher Education.
 - [27] Coimbra, C. F. M., Kleissl, J. und Marquez, R. (2013): Overview of Solar-Forecasting Methods and a Metric for Accuracy Evaluation, Oxford. S. 171–194.
 - [28] Landelius, T., Lindskog, M., Körnich, H., Müller, S., Sirch, T. und Schroedter-Homscheidt, M. (2017): Direct Normal Irradiance Nowcasting Methods for Optimized Operation of Concentrating Solar Technologies, Report: DNICast.
 - [29] Feldhoff, J. F. und Hirsch, T. (2016): An Approach to DNI Transients Characterization for System Evaluation. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Abu Dhabi, Vereinigten Arabischen Emirate.
 - [30] Lunze, J. (2016): Regelungstechnik 1 - Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. 11. überarb. Aufl., Bochum: Springer Vieweg.
 - [31] Chiarappa, T., Maccari, A., Matino, F. und Raggi, C. (2012): A new glass-to-metal seal and a real operating condition accelerated test. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Marrakesch, Marokko.
 - [32] Kuckelkorn, T., Jung, C., Gnädig, T., Lang, C und Schall, C. (2016): Hydrogen generation in CSP plants and maintenance of DPO/BP heat transfer fluids – A simulation approach. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, Solarpaces, Abu Dhabi, Vereinigten Arabischen Emirate.

- [33] Pernpeintner, J., Sutter, F., Happich, Ch., Lüpfer, E., Schiricke, B., Lichtent-
häger, N., Thoss, J., Schumacher, F. (2015): Durability testing of parabolic
trough receivers - overheating, thermal cycling, bellow fatigue and antireflex-
coating abrasion. *Energy Procedia*, Heft 69, S. 1540–1550.
- [34] Dieckmann, S. (2017): DLR - Institut of Solar Research - Greenius - The Green
Energy System Analysis Tool. Online: URL: <http://freegreenius.dlr.de/>,
Aufruf: 06.04.2018.